

Elektromobilität für behördliche Flotten

Leitfaden basierend auf den Ergebnissen
des Forschungsprojektes lautlos&einsatzbereit



Elektromobilität für behördliche Flotten

Leitfaden basierend auf den Ergebnissen
des Forschungsprojektes lautlos&einsatzbereit

November 2020

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

VDI|VDE|IT



NFF NIEDERSÄCHSISCHES
FORSCHUNGSZENTRUM
FAHRZEUGTECHNIK



Inhaltsübersicht

I	Einleitung und thematische Einführung	
1	Grußworte	16
2	Danksagung	20
3	Kurzfassung	21
4	Begrifflichkeiten	23
5	Datenbasis und Anwendungsfälle	26
II	Zentrale Ergebnisse und Handlungsempfehlungen	
6	Entscheidungsunterstützung und Rahmenbedingungen	42
7	Beschaffung	68
8	Betrieb	81
III	Erläuterungen und Verweise	
9	Grundlagen	106
10	Literaturverzeichnis	134
11	Kontakt	138
12	Autoren	139

Inhalt

Inhaltsübersicht	5	
Abbildungsverzeichnis	10	
Tabellenverzeichnis	14	
1	Grußworte	16
2	Danksagung	20
3	Kurzfassung	21
4	Begrifflichkeiten	23
5	Datenbasis und Anwendungsfälle	26
5.1	Datenbasis	26
5.2	Definition der Anwendungsfälle	27
5.2.1	Einsatz- und Streifendienst (ESD)	27
5.2.2	Kriminalermittlungsdienst (KED)	33
5.2.3	Stab & Fiskal	38
5.2.4	Zusammenfassung	41
6	Entscheidungsunterstützung und Rahmenbedingungen	42
6.1	Bezugsrahmen	42
6.2	Rahmenbedingungen strategischer Entscheidungen	45
6.2.1	Umweltpolitik und rechtliche Grundlagen	45
6.2.2	Marktangebot und technische Entwicklungen	48

6.3	Bewertung unterschiedlicher Beschaffungsstrategien	51
6.3.1	Beschaffungsstrategien und Szenarien	51
6.3.2	Haushalterische Auswirkungen	56
6.3.3	Ökologische Auswirkungen	60
6.4	Strategische Maßnahmen zur Umsetzung einer Ausbaustrategie	63
7	Beschaffung	68
7.1	Fahrzeugbeschaffung	68
7.1.1	Technische Mindestanforderungen	68
7.1.2	Ausschreibungs- und Vergabeangelegenheiten	72
7.2	Beschaffung von Ladeinfrastruktur	74
7.2.1	Technische Mindestanforderungen	74
7.2.2	Ausschreibungs- und Vergabeangelegenheiten	76
7.2.3	Aufbau/Installation der Ladeinfrastruktur	78
7.3	Fazit	79
8	Betrieb	81
8.1	Betriebsplanung und -steuerung eines elektrifizierten Fuhrparks	81
8.1.1	Auswirkungen des Betriebs elektrifizierter Fahrzeuge auf die Fuhrparkplanung und -steuerung	81
8.1.2	Monitoring elektrifizierter Fahrzeuge im Fuhrpark	84

8.2	Nutzung elektrifizierter Fahrzeuge im täglichen Gebrauch	85
8.2.1	FAQ zum Betrieb elektrifizierter Fahrzeuge	85
8.2.2	Polizeitaktische Vor- und Nachteile	93
8.3	Besonderheiten bei der Wartung und Instandsetzung elektrifizierter Fahrzeuge	94
8.3.1	Sicherheitsregeln und Qualifizierung von Personal	94
8.3.2	Umgang mit beschädigten elektrifizierten Fahrzeugen	97
8.4	Betrieb von Ladeinfrastruktur	100
8.4.1	Regelmäßige Betriebsaufwände	100
8.4.2	Störungs- und Notfallmanagement	102
8.4.3	Finanzierung	103
8.5	Einschlägige Normen und Vorschriften	103
8.6	Fazit	104
9	Grundlagen	106
9.1	Antriebsarten von Fahrzeugen	106
9.2	Wirkungsgrade von Antrieben	110
9.3	Antriebsleistung elektrifizierter Antriebe	113
9.4	Reichweitenangaben	114
9.5	Aufbau des elektrischen Systems elektrifizierter Fahrzeuge	115
9.6	Ladearten	117
9.7	Kommunikation und Lademanagement	123

9.8	Lade- und Energiemanagement	125
9.9	Batterierecycling	129
9.10	BOS-spezifische Gegebenheiten	130
10	Literaturverzeichnis	134
11	Kontakt	138
12	Autorinnen und Autoren	139

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ergebnis der Näherungsgleichung zur Abschätzung der täglichen Fahrleistung im ESD anhand der Einwohnerzahl am Standort der Dienststelle und reale tägliche Laufleistung der Projektfahrzeuge im ESD	29
Abbildung 2: Tägliche Fahrstrecke im ESD in den Clustern urban, rural, extra rural und BAB	31
Abbildung 3: Strecke pro Fahrt im ESD in den Clustern urban, rural, extra rural und BAB	32
Abbildung 4: Standzeiten zwischen zwei Fahrten im ESD in den Clustern urban, rural, extra rural und BAB	32
Abbildung 5: Anzahl an Fahrten pro Tag im ESD in den Clustern urban, rural, extra rural und BAB	33
Abbildung 6: Strecke pro Fahrt im KED für die Antriebsarten BEV, ICV und PHEV	35
Abbildung 7: Strecke pro Fahrt im KED für die Antriebsarten BEV, ICV und PHEV	36
Abbildung 8: Standzeit an der Dienststelle zwischen Fahrten im KED für die Antriebsarten BEV, ICV und PHEV	36
Abbildung 9: Anzahl an Fahrten pro Tag im KED für die Antriebsarten BEV, ICV und PHEV	37
Abbildung 10: Tägliche Fahrstrecke im Bereich Stab & Fiskal für BEV ₂₃₀ und BEV ₄₂₀	39
Abbildung 11: Strecke pro Fahrt im Bereich Stab & Fiskal für BEV ₂₃₀ und BEV ₄₂₀	39
Abbildung 12: Standzeit an der Dienststelle zwischen Fahrten im Bereich Stab & Fiskal für BEV ₂₃₀ und BEV ₄₂₀	40
Abbildung 13: Anzahl an Fahrten pro Tag im Bereich Stab & Fiskal für BEV ₂₃₀ und BEV ₄₂₀	40

Abbildung 14: Spannungsfeld für Entscheidungstragende aus Politik und Verwaltung	43
Abbildung 15: Übersicht der im Jahr 2018 bestehenden Elektrifizierungspotenziale	53
Abbildung 16: Übersicht der im Jahr 2021 bestehenden Elektrifizierungspotenziale	54
Abbildung 17: Durchschnittliche jährliche Steigerung der Haushaltsmittel [%] im Vergleich anhand der Beschaffungsstrategien und Szenarien.	58
Abbildung 18: Kumulierte klimawirksame Emissionen für die Jahre 2020 bis 2030, für verschiedene Beschaffungsstrategien und Szenarien, unter Einbeziehung des gesamten Fahrzeuglebenszyklus, für die Flotte der niedersächsischen Polizei (2.355 Fahrzeuge).	61
Abbildung 19: Klimawirksame Lebenszyklusemissionen für verschiedene Fahrzeugantriebe und Szenarien in den Jahren 2020 bis 2030, in Gramm CO ₂ -Äquivalente pro Kilometer. „Pro EV“ ICV beschreibt die Emissionen eines ICV im Szenario „Pro EV“.	62
Abbildung 20: Übersicht der empfohlenen Mindeststandards	69
Abbildung 21: Fahrgeschwindigkeiten von ICV und PHEV im ESD	71
Abbildung 22: Lineare Näherung der Entwicklung der Batteriekapazität über der Nutzungszeit für die PHEV im ESD, die durchgezogenen Linien repräsentieren den Zeitraum, indem Messdaten erhoben wurden, die gestrichelten Linien entsprechen einer Prognose bei gleichbleibender Nutzung	83
Abbildung 23: Auf die von den Herstellern angegebene Reichweite nach WLTP bezogene reale Reichweite bei unterschiedlichen Fahrumgebungen als Streuband der eingesetzten BEV-Modelle	86
Abbildung 24: Auf die von den Herstellern angegebene Reichweite nach WLTP bezogene reale Reichweite bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen als Streuband der eingesetzten BEV-Modelle	86

- Abbildung 25: Anteile von Antrieb, Klimatisierung und 12V-Netz am Gesamtenergieverbrauch bei verschiedenen Umgebungstemperaturen 87
- Abbildung 26: CO₂-Emissionen und Energiekosten als Ergebnis einer Simulation verschiedener Antriebskonzepte für eine beispielhafte Realfahrt über eine Distanz von 340 km im Anwendungsfall KED 88
- Abbildung 27: Vergleich von elektrischem Energieverbrauch, Kraftstoffverbrauch, CO₂-Emissionen und Energieträgerkosten von zwei Fahrzeugen im ESD urban, Fahrzeug A mit Lademöglichkeit und Fahrzeug B ohne Lademöglichkeit 90
- Abbildung 28: Elektrifizierungsgrad verschiedener Antriebsarten 110
- Abbildung 29: Antriebsstrangwirkungsgrade η_{An} beispielhafter Fahrzeuge der gleichen Klasse mit den Antriebsarten ICV, HEV, BEV und FCEV bei optimalem Betrieb im WLTP. EM: E-Maschine, LE, Leistungselektronik, 1G: 1-Gang-Getriebe, 8G-DCT: 8-Gang-Doppelkupplungsgetriebe, VM: Verbrennungsmotor 111
- Abbildung 30: Antriebsstrangwirkungsgrad η_{An} eines HEV, wenn durch einen Batterielade-Modus zunächst die Batterie geladen und anschließend mit der geladenen Energie elektrisch gefahren wird. EM: E-Maschine, 8G-DCT: 8-Gang-Doppelkupplungsgetriebe, VM: Verbrennungsmotor 112
- Abbildung 31: Schematische Darstellung der Bordnetz-Struktur von EV. Auf die Darstellung des Ladegeräts wurde der Übersichtlichkeit halber verzichtet. EKK: elektrischer Klimakompressor, DC: Gleichstrom, AC: Wechselstrom, EM: E-Maschine. 116
- Abbildung 32: Darstellung der Reichweite in km bei einstündigem Ladevorgang nach Ladeleistung. Hier wurde ein mittlerer Bedarf von 21 kWh/100 km angenommen. 119

Abbildung 33: Ladekommunikationsstandards und Protokolle	123
Abbildung 34: Manager-Worker-Prinzip	125
Abbildung 35: Aufbau eines Backends	126
Abbildung 36: Übersicht über statische und dynamische Daten	128
Abbildung 37: Polizeifahrzeuge neben dem Haupteingang einer Dienststelle; Die Wallboxen wurden an der Hauswand hinter den Fahrzeugen installiert.	132

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewählte technische Daten der im Forschungsprojekt eingesetzten BEV und PHEV sowie die Fahrzeuganzahl des jeweiligen Modells und die Anwendungsfälle, in denen die Modelle eingesetzt wurden	26
Tabelle 2: Definition der räumlichen Cluster im Anwendungsfall ESD anhand der Einwohnerzahl am Standort der Dienststelle sowie Anteil der Fahrumbgebungen an der Gesamtleistung	30
Tabelle 3: Durchschnittliche tägliche Fahrleistung in den Clustern des Anwendungsfalls ESD für verschiedene Perzentile	31
Tabelle 4: Anteil der Ersatzbeschaffungen in den Strategien	55
Tabelle 5: Energieinhalt bzw. Energiedichte von Kraftstoffen	113
Tabelle 6: Ladearten und ihre Eigenschaften	118
Tabelle 7: Übersicht von Ladevorrichtungen	120
Tabelle 8: Steckertypen	122

I. Einleitung und thematische Einführung

1 Grußworte

Grußwort von Polizeipräsident Michael Pientka zur Fertigstellung des Abschlussberichtes des Projektes „lautlos&einsatzbereit“

Polizeifloten zeichnen sich durch eine Vielzahl verschiedener Fahrzeugtypen, eine hohe Fahrzeuganzahl und eine große Sichtbarkeit ihrer Fahrzeuge aus. Aufgrund der Vorbildfunktion der Polizei in der Gesellschaft ist ein nachhaltiger und umweltfreundlicher Betrieb dieser Flotten durch den Einsatz neuer Antriebstechnologien von besonderer Relevanz.

Das Land Niedersachsen hat sich im Herbst 2016 mit zwei Projektpartnern, der Polizeidirektion Braunschweig und dem Niedersächsischen Forschungszentrum für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig auf den Weg gemacht, um ein bundesweit einmaliges Projekt mit dem Titel „lautlos&einsatzbereit“ zu starten. Projektziel war, einen Leitfaden für die integrierte Planung sowie den ökologischen und ökonomischen Betrieb von Fahrzeugflotten unter extremen Einsatzbedingungen zu entwickeln.

Mit einem kleinen Projektteam der Polizei und einem kompetenten Kooperationspartner der Technischen Universität Braunschweig ist es gelungen, gemeinsam die großen, unerwarteten Herausforderungen während des Projektverlaufes zu meistern und sich mit pragmatischen Lösungen immer weiter zu entwickeln. Das Team war in vielen Bundes- und angrenzenden EU-Ländern unterwegs und konnte zudem eine Kooperation mit Luxemburg schließen. Politische, polizeiliche und kommunale Entscheider ließen sich im Projektverlauf rund um die Themen Elektromobilität und Ladeinfrastruktur beraten. Auf der Basis von „lautlos&einsatzbereit“ wurde so die strategische Entscheidung getroffen und die elektrifizierte Flotte der Polizei Niedersachsen umfangreich ergänzt.

Durch die Einbindung von unterschiedlichen länderübergreifenden Kooperationspartnern konnten viele Perspektiven berücksichtigt und damit die Akzeptanz und Reichweite für einen Leitfaden als Projektergebnis erhöht werden. Auf lange Sicht unterstützt der Leitfaden den planerischen und wirtschaftlichen Umgang mit Elektrofahrzeugen nicht nur in Niedersachsen.

Ich freue mich, dass unser Projekt mit diesem beeindruckenden Ergebnis beendet werden konnte und möchte mich bei unserem Projektpartner der Technischen Universität Braunschweig, unserem Projektteam sowie allen Mitwirkenden für die wegweisenden und innovativen Erkenntnisse und Ergebnisse sehr herzlich bedanken.

Ihr



Michael Pientka

Polizeipräsident der Polizeidirektion Braunschweig



Grüßwort der Präsidentin der Technischen Universität Braunschweig, Prof. Dr. Katja Koch, zur Fertigstellung des Abschlussberichts zum Projekt „lautlos&einsatzbereit“.

Die Technische Universität Braunschweig hat den Anspruch, auf herausragendem Niveau mit hoher Relevanz zu forschen. In unserem Forschungsschwerpunkt Mobilität arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Bereich der fahrzeug- und verkehrstechnischen sowie betriebswirtschaftlichen Forschung und der Energiespeicherforschung eng und fächerübergreifend zusammen. Sie widmen sich sowohl den technischen als auch den ökologischen, sozialen und ökonomischen Herausforderungen der nachhaltigen Fortbewegung.

Die Zusammenarbeit mit der Polizei Niedersachsen im Projekt „lautlos&einsatzbereit“ hat sich hier als Glücksfall erwiesen. Erstmals ergab sich die Gelegenheit, umfassende Einblicke in den Betrieb einer Fahrzeugflotte mit extrem anspruchsvollen Einsatzszenarien zu erhalten. Exemplarisch konnten grundlegende Erkenntnisse über die Elektromobilität in diesen Dimensionen gewonnen werden. Sie sind für Behörden, Organisationen und Unternehmen, die Flotten betreiben, ebenso relevant wie für die Flottenplaner und -nutzer sowie die Hersteller von Fahrzeugen und Ladeinfrastrukturen.

Vom Erkenntnisgewinn aus der Erforschung der hochkomplexen Nutzungsszenarien mit umfangreichen Daten, die von August 2017 bis April 2020 gewonnen werden konnten, profitieren ebenso Forschende, Lehrende und Studierende an der Technischen Universität Braunschweig.

Das Projekt liefert die Basis für strategische Entscheidungen für die konkrete Gestaltung der Energiewende. Zahlreich Anfragen aus anderen Behörden und Organisationen, aus Deutschland und den angrenzenden Ländern belegen den Erfolg von „lautlos&einsatzbereit“. Der hier erstellte Leitfaden wird Anwender, Hersteller, Behörden wie auch politische Entscheider auf dem Weg zur nachhaltigen Mobilität von morgen maßgeblich unterstützen.

Unserem Partner, der Polizei Niedersachsen, allen dort involvierten Kolleginnen und Kollegen, allen Unterstützern wie auch dem gesamten Projektteam an unserer Carolo-Wilhelmina danke ich sehr für die hervorragende und äußerst fruchtbare Zusammenarbeit.

Ihre



Prof. Dr. Katja Koch, m.d.W.d.G.b.

Präsidentin der Technischen Universität Braunschweig



2 Danksagung

Für die Durchführung eines derartigen Forschungsprojektes waren auf unterschiedlichen Ebenen viele Partner nötig. Daher möchten wir uns im Namen des gesamten Projektteams an dieser Stelle bei allen projektbeteiligten Institutionen und Organisationen für die vielfältige Unterstützung bedanken. Nur gemeinsam konnte das Vorhaben umgesetzt werden.

Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)¹ für die Förderung des Forschungsprojektes, dem Niedersächsischen Ministerium für Wirtschaft, Arbeit, Verkehr und Digitalisierung für weitere finanzielle Unterstützungen sowie beim Niedersächsischen Ministerium für Inneres und Sport für die Konsortialführung und kontinuierliche Begleitung. Ebenfalls bedanken möchten wir uns beim Projektträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH für die professionelle Beratung und Begleitung sowie bei allen beteiligten Polizeidirektionen, dem Landeskriminalamt und der Polizeiakademie der Polizei Niedersachsen für die Bereitschaft der Erprobung der teil- und vollelektrischen Fahrzeuge sowie der entsprechenden Ladeinfrastruktur.

Der Polizei Luxemburg gilt unser Dank für die offene Beteiligung am Forschungsprojekt lautlos&einsatzbereit.



Dr. Kerstin Schmidt

Projektleitung Technische Universität Braunschweig



Oliver Suckow

Projektleitung Polizei Niedersachsen



¹ FKZ 16EM3107-1/-2

3 Kurzfassung

Der Forderung nach einer nachhaltigen Mobilität können Unternehmen und Behörden mittelfristig nur durch die Integration hybrider und batterieelektrischer Fahrzeuge in ihren Flotten nachkommen. Ein umweltschonender Einsatz dieser Fahrzeuge kann hierbei insbesondere durch die Versorgung der Fahrzeuge mit Energie aus erneuerbaren Energiequellen, wie zum Beispiel lokalen Erzeugungsanlagen, gewährleistet werden. Bislang stellt die Auslegung der Flotten-, Energie- und Ladeinfrastruktur die Planenden, Beschaffenden und Betreibenden von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur (LIS) jedoch vor große Herausforderungen.

Vor diesem Hintergrund startete das Forschungsprojekt lautlos&einsatzbereit am 1. September 2016. Zusammen mit der Technischen Universität Braunschweig sowie dem Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF) wurde der kombinierte Einsatz von Plug-in-hybriden (PHEV) und batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) innerhalb der Polizei Niedersachsens getestet. Die Erhebung von umfangreichen Messdaten hinsichtlich der Mobilitäts- und Ladebedarfe in den Fahrzeugen selbst sowie in der LIS ermöglichte eine fundierte wissenschaftliche Begleitforschung durch die Technische Universität Braunschweig. Im Vordergrund des Forschungsprojektes stand die Fragestellung, ob sich elektrifizierte Fahrzeuge (EV²) unter Extrembedingungen, aber auch für den generellen Einsatz bei der Polizei eignen und welche Herausforderungen eine funktionierende elektrifizierte Flotte mit sich bringt.

Wurden in Vorgängerprojekten häufig Fahrzeuge insbesondere im Bereich der Fiskalfahrten getestet, wurden die Schwerpunkte des Forschungsprojektes lautlos&einsatzbereit nunmehr in Extrembereichen wie den Einsatz- und Streifendiensten (ESD) sowie den Ermittlungsdiensten (ZKD, KED, KDD) gesetzt. Die zur Verfügung gestellten Projektmittel ermöglichten die Beschaffung von 53 Fahrzeugen und 51 Ladepunkten für die Polizei Niedersachsen und damit die Erprobung in den Einsatz- und Streifendiensten, den (Zentralen) Kriminalermittlungsdiensten sowie in Bereichen mit Stabs- und Fiskalfahrten.

² Die Abkürzung EV bezieht sich im Leitfaden auf elektrifizierte Fahrzeuge der Antriebsarten PHEV und BEV.

Polizeiliche Fahrzeugflotten werden unter Extrembedingungen betrieben, da Polizeifahrzeuge grundsätzlich rund um die Uhr verfügbar sein müssen und sowohl einer hohen Flexibilität und Fahrleistung, als auch einer Unplanbarkeit hinsichtlich des Einsatzes und der jeweiligen Reichweiten unterliegen. Diese Aspekte verschärfen sich nochmals bei der vergleichenden Betrachtung der unterschiedlichen Anforderungen in den verschiedenen Polizeibehörden. Beispielsweise unterliegt ein Funkstreifenwagen des Einsatz- und Streifendienstes in einem Flächenlandkreis anderen Nutzungsbedingungen als im innerstädtischen Bereich. Darüber hinaus werden die Fahrzeuge durch die häufigen Nutzerwechsel sehr stark beansprucht. Ähnlich hohe Anforderungen sind in Fuhrparks privater beziehungsweise privatwirtschaftlicher Unternehmen kaum zu finden. Auch innerhalb von öffentlichen Institutionen oder Organisationen kommen solch extreme Anforderungen selten zusammen.

Der vorliegende, innerhalb des Forschungsprojektes erstellte Leitfaden zur integrierten Planung und Steuerung von Flotten-, Lade- und Energieinfrastruktur wird daher Entscheidungstragende aus Politik und Verwaltung, Fuhrpark- und Ladeinfrastrukturverantwortliche, Flottenmanager sowie Nutzende bei der Planung, der Beschaffung und dem Betrieb von Flotten mit besonderen Anforderungen unterstützen und damit eine Übertragung der erzielten Ergebnisse auf weitere Bereiche mit ähnlichen Anwendungsprofilen ermöglichen. In Frage kommen dabei auch Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) wie beispielsweise Feuerwehren, Technisches Hilfswerk und Rettungsdienste. Das Vorliegen einer praxistauglichen Planungsgrundlage für die Polizei dient damit auch problemlos der Anwendung auf weit weniger anspruchsvolle Flotten.

Das Forschungsprojekt endete am 31.03.2020.

4 Begrifflichkeiten

AC	Wechselstrom (alternating current)	
BAB	Bundesautobahn	
BABFUSTW	Funkstreifenwagen Bundesautobahn	Einsatzfahrzeug aus dem Segment der oberen Mittelklasse mit polizeilicher Sonderausstattung (Funk, Sondersignalanlage, Folierung etc.)
BAO	Besondere Aufbau Organisation	Eine BAO wird z. B. bei einem Großeinsatz eingerichtet, wenn dieser nicht mit den Kräften und der Ausstattung der Alltagsorganisation bewältigt werden kann
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (Battery electric vehicle)	Fahrzeug mit elektrischem Antrieb und einer Batterie als primärer Energiequelle
BHLKW	Behördenleiterkraftwagen	Zivile Kraftfahrzeuge ohne polizeiliche Sonderausstattung aus gehobenen Segment für repräsentative Zwecke
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben	
CCS	Combined Charging System	Ladesystem zur Schnellladung; insbesondere von europäischen und nordamerikanischen Fahrzeugherstellern verwendet; in der EU für öffentliche Schnellladesäulen vorgeschrieben
CH ₄	Methan	
CHAdMO		Ladesystem zur Schnellladungen; fast ausschließlich von japanischen Fahrzeugherstellern verwendet
CO ₂	Kohlendioxid	
DC	Gleichstrom (direct current)	
EC	Europäische Kommission (European Commission)	
ESD	Einsatz- und Streifendienst	Bereiche des polizeilichen Einzeldienstes im 24/7-Betrieb
ESD-BAB	Einsatz- und Streifendienst auf Bundesautobahnen (sog. Autobahnpolizei)	Polizeilichen Einzeldienstes im 24/7-Betrieb mit originärem Zuständigkeitsbereich auf Bundesautobahnen
EU	Europäische Union	
EV	Elektrofahrzeug (electric vehicle)	Elektrifizierte Fahrzeuge der Antriebsarten PHEV und BEV
extra rural		Besonders ländliches Gebiet
FAQ	Wiederkehrend gestellte Fragen (Frequently asked questions)	
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (Fuel cell electric vehicle)	Fahrzeug mit elektrischem Antrieb und einer Brennstoffzelle als primärer Energiequelle
FI / FI-Schalter	Fehlerstrom-Schutzschalter	
FKW/PFC	perfluorierte Kohlenwasserstoffe / perfluorocarbons	
FUSTW	Funkstreifenwagen	Einsatzfahrzeug überwiegend aus dem Segment der Mittelklasse mit polizeilicher Sonderausstattung (Funk, Sondersignalanlage, Folierung etc.)

FUSTW-A-	Funkstreifenwagen atypisch	In Bezug auf Segment und Sonderausstattung nicht standardisierter FUSTW-N-
FUSTW-N-	Funkstreifenwagen neutral	Funkstreifenwagen inkl. Funk und mobilem Blaulicht, allerdings ohne Folierung und verdeckt verbauten Bedienteilen
GFUSTW	Großraum-Funkstreifenwagen	Einsatzfahrzeug aus dem Segment der Utilities mit polizeilicher Sonderausstattung (Funk, Sondersignalanlage, Folierung etc.)
GFUSTW-N-	Großraum-Funkstreifenwagen neutral	Großraum-Funkstreifenwagen inkl. Funk und mobilem Blaulicht, allerdings ohne Folierung und verdeckt verbauten Bedienteilen
HEV	Hybridfahrzeug (Hybrid electric vehicle)	Fahrzeug dessen Antrieb einen Verbrennungsmotor und einen oder mehrere Elektromotoren enthält
H-FKW/HFC	Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe / Hydrofluorocarbons	
HV	Hochvolt	Spannungen oberhalb von 60V
ICV	Konventionelles Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (Internal combustion engine vehicle)	Fahrzeug mit Antrieb ausschließlich durch einen Verbrennungsmotor
IEC	International Electrotechnical Commission	Normungsorganisation
KDD	Kriminaldauerdienst	
KED	Kriminalermittlungsdienst	Polizeiliche Ermittlungsbereiche
KFZ-L-	Kraftfahrzeug Leasing	KFZ-N-, welche über eine feste Laufzeit geleast und in regelmäßigen Intervallen durch ein neueres Modell ersetzt werden
KFZ-N-	Kraftfahrzeug neutral	Zivile Kraftfahrzeuge ohne polizeiliche Sonderausstattung
LHO	Landeshaushaltsordnung	Vom jeweiligen Landtag verabschiedetes Landesgesetz, welches verbindlich das Haushalts-, Rechnungs- und Prüfungswesen regelt
LIS	Ladeinfrastruktur	Allgemeine Beschreibung der Gesamtheit aller Komponenten außerhalb des Fahrzeuges, die zum Laden von Elektrofahrzeug notwendig sind
Lkw	Lastkraftwagen	
LM	Lademanagement	
LP	Ladepunkt	Ein Anschluss, an dem ein EV geladen werden kann
LV	Leistungsverzeichnis	
MHEV	Mildhybridfahrzeug (Mild hybrid electric vehicle)	Hybridfahrzeug mit relativ geringer elektrischer Leistung
MODBUS		Kommunikationsprotokoll, dass zur Kommunikation zwischen einem Client und einem Server dient
MWS	Motorweiterlaufschaltung	Ermöglicht es, den Motor von Einsatzfahrzeugen in Betrieb zu halten, obwohl der Fahrzeugschlüssel aus dem Innenraum entnommen und das Fahrzeug selbst von außen verschlossen wird
N ₂ O	Distickstoffmonooxid (Lachgas)	

NEFZ	Neuer europäischer Fahrzyklus	Bis 2018 in Europa gültiges Prüfprogramm zur Ermittlung von Verbrauch, der CO ₂ - und Schadstoffemissionen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen; wird weiterhin bei Angaben zur Reichweite elektrifizierter Fahrzeuge verwendet
NKlimaG	Niedersächsisches Klimagesetz	
OCPP	Open Charge Point Protocol	Backendprotokoll, das zur Kommunikation zwischen Ladepunkt und Backend dient
PHEV	Plug-in-Hybridfahrzeug (Plug-in hybrid electric vehicle)	Hybridfahrzeug mit der Möglichkeit die Antriebsbatterie über eine externe Quelle nachzuladen
Pkw	Personenkraftwagen	
PV	Photovoltaik	Umwandlung von Strahlungsenergie in elektrische Energie
rural		Ländliches / gemischtes Gebiet
SF ₆	Schwefelhexafluorid	
SoC	Ladezustand (State of Charge)	
SoH	Gesundheitszustand (State of Health)	
urban		Großstädtisches Gebiet
VDA	Verband der Automobilindustrie	
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik	
Wallbox		Wandladestation
WLTP	Weltweit harmonisiertes Testverfahren für leichte Fahrzeuge (World wide harmonized Light vehicles Test Procedure)	Seit 2018 in Europa gültiges Prüfprogramm zur Ermittlung von Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch, CO ₂ - und Schadstoffemissionen von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen; Nachfolger des NEFZ
ZKD	Zentraler Kriminaldienst	
ZKI	Zentrale Kriminalinspektion	

5 Datenbasis und Anwendungsfälle

5.1 Datenbasis

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden 26 PHEV und 27 BEV beschafft und in verschiedenen Einsatzbereichen der Polizei Niedersachsen verwendet. Eine Übersicht der Fahrzeuge, ausgewählter technischer Daten sowie die Anzahl an Fahrzeugen des jeweiligen Modells und die Anwendungsfälle, in denen sie eingesetzt wurden, ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Ausgewählte technische Daten der im Forschungsprojekt eingesetzten BEV und PHEV sowie die Fahrzeuganzahl des jeweiligen Modells und die Anwendungsfälle, in denen die Modelle eingesetzt wurden

Fahrzeug	Volkswagen Passat GTE	Volkswagen eGolf	BMW i3	Opel Ampera-e
Antriebsart	PHEV	BEV	BEV	BEV
Leistung [kW]	160	100	125	150
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	225	150	150	150
Batteriekapazität gesamt/nutzbar [kWh]	9,9/8	35,8/31,5	33,2/27,2	-/60
Elektrische Reichweite NEFZ/WLTP [km]	50/-	300/231	300/245	520/423
Anzahl der Fahrzeuge	26	19	1	7
Anwendungsfälle	ESD (urban, rural, extra rural), KED urban	KED, Stab & Fiskal	Stab & Fiskal	ESD rural, KED, Stab & Fiskal

Die Projektfahrzeuge wurden mit Datenloggern ausgestattet, mit denen diverse fahrzeu- ginterne Daten der Steuergeräte, wie Fahrgeschwindigkeit, Temperaturen, Leistungen etc. sowie GPS-Position und Zeitpunkt (Datum und Uhrzeit) aufgezeichnet wurden. Anhand dieser Daten wurde die Fahrzeugnutzung charakterisiert und der Mobilitätsbedarf sowie der Energie- und Kraftstoffverbrauch ermittelt. Diese Art der Datenerhebung wurde gewählt, da der Informationsgehalt anderer Datenquellen wie z. B. von Fahrtenbüchern nicht ausreichend war. Über die BEV und PHEV hinaus wurden ausgewählte konventio- nelle Fahrzeuge (ICV) mit Datenloggern ausgerüstet, um einen Vergleich der Fahrprofile elektrifizierter Fahrzeuge mit denen konventioneller Fahrzeuge zu ermöglichen.

Über den Messzeitraum von August 2017 bis April 2020 wurden Daten von insgesamt 51 Fahrzeugen erhoben. In dieser Zeit wurden mehr als 3,1 Mio. Kilometer zurückgelegt und mehr als 94.000 h an Messdaten generiert.

5.2 Definition der Anwendungsfälle

Im Folgenden werden die Anwendungsfälle, in denen die Projektfahrzeuge bei der Polizei Niedersachsen eingesetzt wurden, beschrieben und ihr Mobilitätsbedarf durch verschiedene, aus den Messdaten ermittelten Parametern charakterisiert. Anhand dessen wird es ermöglicht, Ähnlichkeiten zu anderen Anwendungsfällen zu identifizieren und die Erkenntnisse auf andere Bereiche zu übertragen.

5.2.1 Einsatz- und Streifendienst (ESD)

Der ESD wird als Sammelbegriff für Organisationsbereiche und -einheiten genutzt, welche für die Wahrnehmung der polizeilichen Aufgaben Prävention, Gefahrenabwehr, Strafverfolgung und Verfolgung von Ordnungswidrigkeiten etc. in einem festgelegten regionalen Bereich zuständig sind. Er gewährleistet eine flächendeckende Polizeipräsenz im Rund-um-die-Uhr-Betrieb. Eine weitere Unterteilung der Organisationsformen und Anbindungen wurde aus Gründen der Vereinfachung nicht vorgenommen.

Der im Folgenden technisch näher charakterisierte ESD zeichnet sich im Wesentlichen dadurch aus, dass die Fahrzeuge rund um die Uhr verfügbar sein müssen und sowohl eine hohe Flexibilität und Fahrleistung als auch die vergleichsweise größten Reichweiten erfordern (urban ca. 250 km; rural ca. 350–400 km; extra rural ca. 500 km). Die Fahrleistungen weisen eine große Spannweite auf und betragen in diesem Anwendungsfall häufig zwischen 20.000 und 90.000 Kilometer pro Fahrzeug und Jahr. Ebenso wie die einzelnen teilweise geplanten, häufiger jedoch völlig ungeplanten Ad-hoc-Fahrten sind auch die Anzahl der unmittelbar aufeinanderfolgenden Fahrten, das abgesetzte Verweilen am Einsatzort oder die Rückkehr zum Heimatstandort unplanbar. Darüber hinaus werden die hier beschriebenen Fahrzeuge mehrfach täglich von wechselnden Nutzern gefahren. Die Fahrzeuge sind in der Regel mit zusätzlichen (polizeilichen) Sonderein-

bauten ausgestattet und verfügen über Nebenverbraucher wie Sondersignalanlagen, Funk etc. und hohe Zuladungskapazitäten.

Im Anwendungsfall ESD wurden insgesamt 22 VW Passat GTE (urban, rural und extra rural) sowie ein Opel Ampera-e (rural) eingesetzt. Des Weiteren wurde zwei ICV betrachtet, eines im ESD urban sowie eine Mercedes-Benz E-Klasse im ESD BAB. Fahrzeuge der Autobahnpolizei unterscheiden sich zu konventionellen FUSTW im ESD in urbanen und ländlichen Regionen durch folgende Faktoren, weshalb eine eigene Betrachtung nötig ist:

- Deutlich längere Fahrtstrecken (pro Fahrt und pro Tag),
- höhere Motorleistung,
- höhere Endgeschwindigkeit (>230 km/h),
- höhere Beschleunigung (Einfädeln vom Standstreifen in den fließenden Verkehr),
- höhere Zuladung,
- größerer Stauraum (Mitführen von umfangreicher Absicherungstechnik),
- höheres Fahrzeugsegment (obere Mittelklasse).

Zur Übertragung der Erkenntnisse auf weitere Dienststellen ist die Kenntnis über die Fahrzeugnutzung von hoher Relevanz. Daher wurde ein Zusammenhang zwischen täglicher Fahrleistung und einem wesentlichen Kennparameter, der die Dienststelle charakterisiert, abgeleitet. Dabei hat sich die Einwohnerzahl am Standort der Dienststelle als am besten geeignet herausgestellt. Auf Basis der Messdaten wurde als Näherungsgleichung

$$\text{tägliche Fahrstrecke} = \sqrt[3]{\frac{1,3 \cdot 10^9}{\text{Einwohnerzahl [1.000]}}}$$

entwickelt, mit der Strecke in km und der Einwohnerzahl in 1.000 Einwohnern. Die Gleichung liefert dabei das 90%-Perzentil der täglichen Fahrleistung, d.h. an 90% der Tage im Messzeitraum war die tägliche Fahrstrecke kürzer als der errechnete Wert. Abbildung 1 zeigt den Verlauf der Näherungsfunktion sowie die realen Daten der Standorte der Projektfahrzeuge.

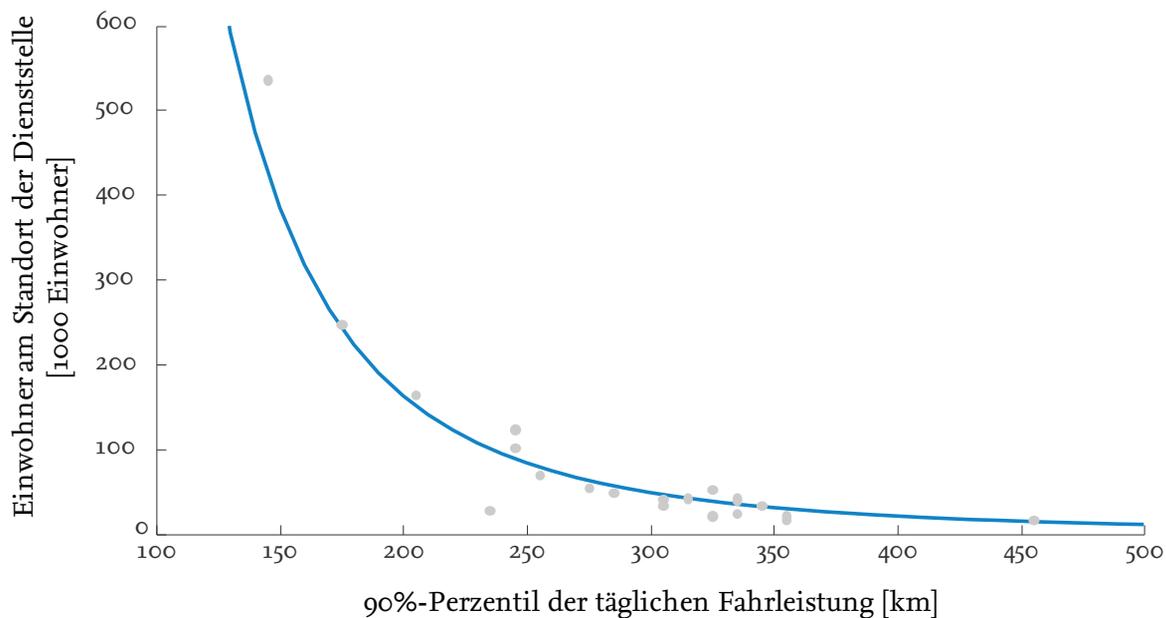


Abbildung 1: Ergebnis der Näherungsgleichung zur Abschätzung der täglichen Fahrleistung im ESD anhand der Einwohnerzahl am Standort der Dienststelle und reale tägliche Laufleistung der Projektfahrzeuge im ESD

Für die Näherung gibt es einige Besonderheiten und Einflussgrößen zu beachten:

- Die Gleichung ist nicht für den Anwendungsfall BAB gültig.
- Aufgrund der bevorzugten Nutzung der Projektfahrzeuge gegenüber anderen bereits im Fuhrpark vorhandenen Fahrzeugen gilt die errechnete Laufleistung ferner für priorisiert eingesetzte Fahrzeuge („erstes Fahrzeug“).

Für große Einwohnerzahlen reduziert sich die Fahrstrecke zunehmend, bei 1,3 Mio. Einwohnern würde die Fahrleistung auf unter 100 km am Tag sinken. In Anbetracht einer Nutzung der Fahrzeuge in mehreren Schichten am Tag würde dies zu unrealistisch geringen Durchschnittsgeschwindigkeiten führen. Bereits bei der im Forschungsprojekt betrachteten Dienststelle mit mehr als 500.000 Einwohnern am Standort ist das Ergebnis der Näherungsgleichung kleiner als die tatsächliche Fahrleistung. Es ist daher zu erwarten, dass eine untere Grenze der täglichen Fahrleistung bei durchschnittlich etwa 130–150 km erreicht wird. Analog dazu gilt im umgekehrten Fall für Standorte mit sehr kleinen Einwohnerzahlen, dass die Fahrstrecken nicht beliebig lang werden können. Hier wären entsprechend hohe Durchschnittsgeschwindigkeiten erforderlich, welche abseits der Autobahnen jedoch nicht zu erreichen sind. Die obere Grenze wird hier wahrscheinlich durchschnittlich bei 500–600 km liegen.

Durch organisatorische Besonderheiten kann die tatsächliche Laufleistung stark von der prognostizierten Laufleistung abweichen. An einer Projektdienststelle müsste beispielsweise die tägliche Laufleistung nach Einwohnerzahl bei ca. 350 km liegen. Tatsächlich betrug sie jedoch weniger als 250 km. Dies war einerseits auf mehrere nachgeordnete Dienststellen im direkten Umland der Projektdienststelle sowie andererseits auf eine Verbundstreife mit einer benachbarten Autobahndienststelle (unter Nutzung der Fahrzeuge der BAB-Dienststelle) zurückzuführen. Das Projektfahrzeug wurde daher fast ausschließlich im Stadtgebiet genutzt und musste seltener längere Strecken in das Umland zurücklegen.

Aus den Erkenntnissen wurden drei räumliche Cluster (urban, rural, extra rural) abgeleitet, deren Definition und Fahrumsgebungsanteile in Tabelle 2 aufgeführt sind. Zusätzlich gibt es das Cluster BAB, welches Autobahndienststellen beschreibt. Eine städtische Fahrumsgebung ist in Städten mit mehr als 160.000 Einwohnern gegeben. Andernfalls wird die Fahrumsgebung als ländlich klassifiziert. In der Fahrumsgebung Autobahn sind auch sogenannte Stadtautobahnen enthalten.

Tabelle 2: Definition der räumlichen Cluster im Anwendungsfall ESD anhand der Einwohnerzahl am Standort der Dienststelle sowie Anteil der Fahrumsgebungen an der Gesamtleistung

Anwendungsfall	Einwohnerzahl am Standort der Dienststelle	Durchschnittlicher Weganteil von Fahrumsgebungen		
		Stadt	Land	Autobahn
ESD urban	> 160.000	92,7 %	4 %	3,3 %
ESD rural	17.000–160.000	7,7 %	89 %	3,3 %
ESD extra rural	< 17.000	0,1 %	99,2 %	0,7 %
ESD BAB ³	-	0,4 %	23,3 %	76,4 %

³ Die Anteile der Fahrumsgebungen Stadt und Land variieren je nach Standort der BAB-Dienststelle. Im betrachteten Fall, befand sich der Standort der Dienststelle in ländlicher Umgebung. Bei einer Dienststelle in städtischer Umgebung dürfte der Anteil der städtischen Fahrumsgebung entsprechend größer sein.

Im Folgenden werden die Nutzungsprofile von ESD-Fahrzeugen in den jeweiligen Clustern dargestellt. Dazu wurden die Daten aller Projektfahrzeuge im selben Cluster aggregiert. Um die Eignung von Anwendungsfällen für BEV bewerten zu können, sind insbesondere die tägliche Fahrleistung, die Strecken pro Fahrt sowie die Standzeit zwischen Fahrten relevant, da diese entscheidend sind für die erforderliche Reichweite und Ladeleistung. Abbildung 2 zeigt die Anteile der täglichen Fahrstrecken im ESD.

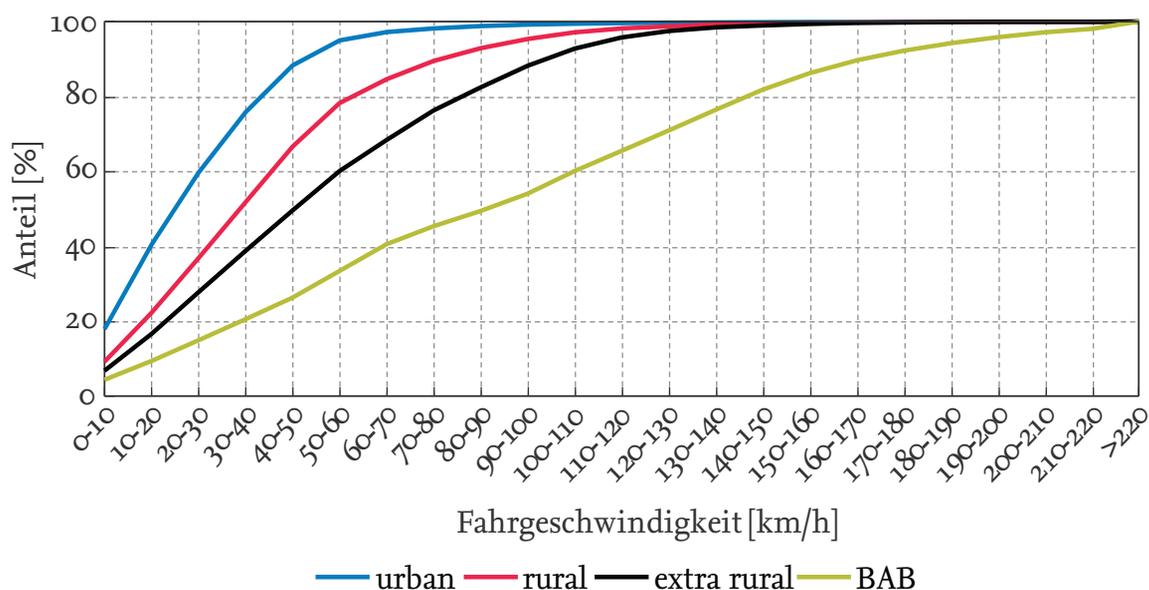


Abbildung 2: Tägliche Fahrstrecke im ESD in den Clustern urban, rural, extra rural und BAB

Die tägliche Fahrleistung im ESD urban ist im Vergleich zwischen den Clustern gering. Demgegenüber weist das Cluster BAB mit Abstand die höchsten Fahrleistungen pro Tag auf. Tabelle 3 zeigt die täglichen Fahrleistungen der Cluster, welche 50 %, 90 % und 99 % repräsentieren.

Tabelle 3: Durchschnittliche tägliche Fahrleistung in den Clustern des Anwendungsfalls ESD für verschiedene Perzentile

Perzentil	50 %	90 %	99 %
ESD urban	111 km	183 km	244 km
ESD rural	188 km	303 km	409 km
ESD extra rural	233 km	437 km	581 km
ESD BAB	452 km	761 km	>1.000 km

Neben der täglichen Fahrleistung ist insbesondere auch die zurückgelegte Strecke jeder Fahrt relevant. Eine Fahrt beginnt und endet an der Heimdienststelle. Abbildung 3 zeigt die Strecke pro Fahrt im ESD.

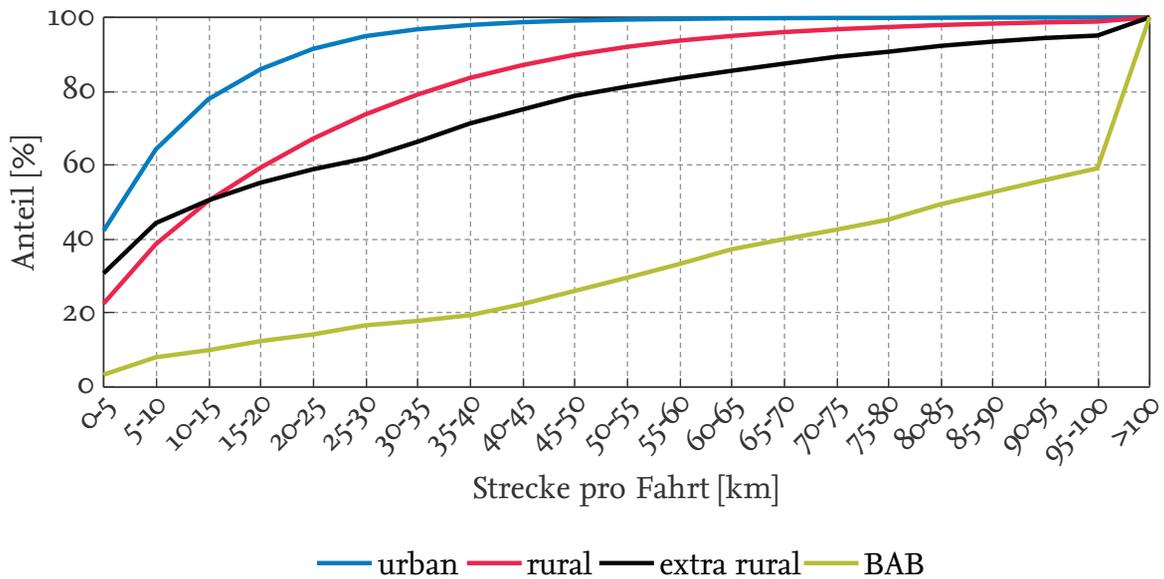


Abbildung 3: Strecke pro Fahrt im ESD in den Clustern urban, rural, extra rural und BAB

In den Clustern rural und extra urban werden selten pro Fahrt mehr als 100km zurückgelegt. Wie auch bei der täglichen Fahrleistung sind Fahrten im ESD urban kürzer, mehr als 50 km sind äußerst selten. Im ESD BAB sind hingegen etwa 40 % aller Fahrten länger als 100 km. Die Standzeiten zwischen zwei Fahrten ist in Abbildung 4 dargestellt.

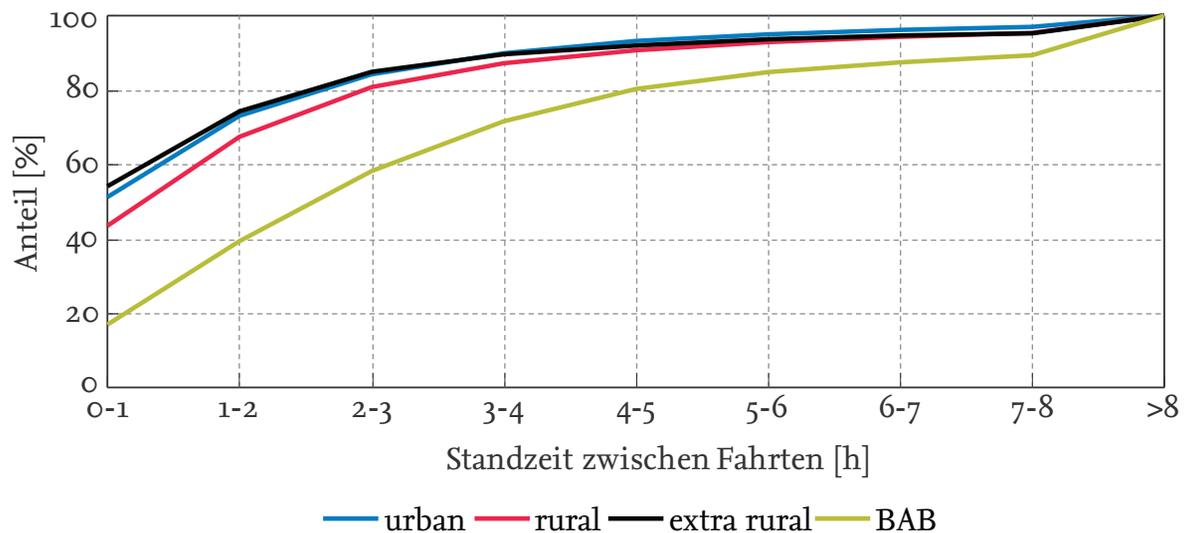


Abbildung 4: Standzeiten zwischen zwei Fahrten im ESD in den Clustern urban, rural, extra rural und BAB

Im Hinblick auf die Standzeiten, welche als potenzielle Ladezeiten geeignet sein können, gibt es zwischen den Clustern urban, rural und extra rural nur geringe Unterschiede. Etwa 80–90 % aller Standzeiten sind kürzer als 3 h, wobei rund die Hälfte aller Standzeiten sogar kürzer als 1 h ist. Erheblich länger sind die Standzeiten im Vergleich dazu im Anwendungsfall ESD BAB, hier sind weniger als 20 % kürzer als 1 h. Entsprechend der vorherigen Erkenntnisse ergibt sich die Anzahl von Fahrten pro Tag in den Clustern (vgl. Abbildung 5).

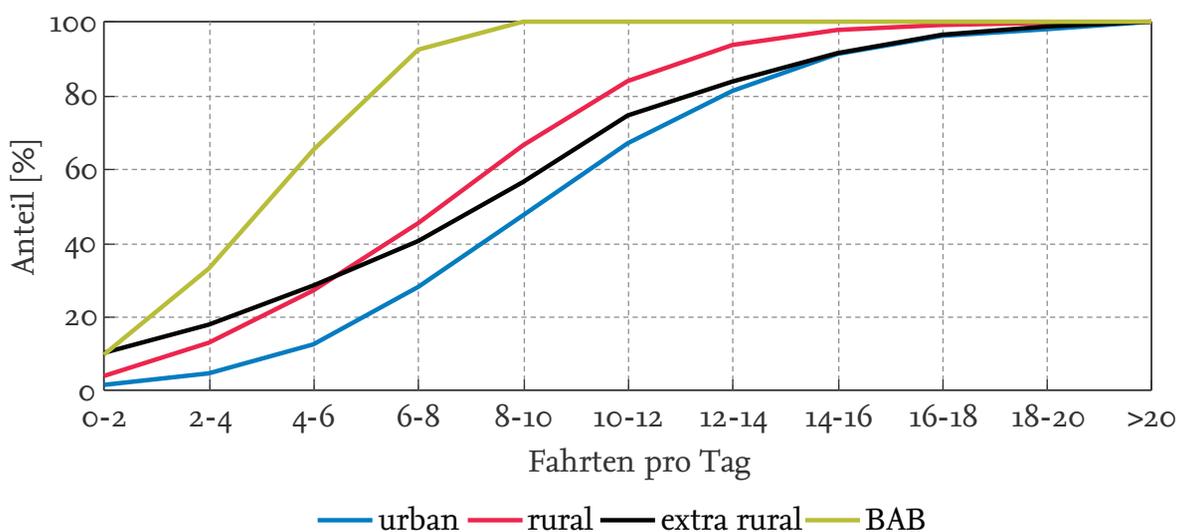


Abbildung 5: Anzahl an Fahrten pro Tag im ESD in den Clustern urban, rural, extra rural und BAB

Auch hier sind die Unterschiede zwischen dem urbanen, ruralen und extra ruralen Cluster gering. An BAB-Dienststellen gibt es weniger Fahrten am Tag, dies korreliert mit den längeren Fahrtstrecken und Standzeiten an der Dienststelle.

5.2.2 Kriminalermittlungsdienst (KED)

Der KED wird als Sammelbegriff für Organisationsbereiche und -einheiten genutzt, welche für die Wahrnehmung der Bekämpfung der allgemeinen und teilweise auch schweren Kriminalität zuständig sind. Eine weitere Unterteilung der Organisationsformen sowie deren Anbindungen wurde aus Gründen der Vereinfachung nicht vorgenommen.

Der im Folgenden technisch näher charakterisierte KED zeichnet sich im Wesentlichen dadurch aus, dass die äußerlich zivilen Fahrzeuge grundsätzlich im Ein-Schicht-Betrieb und nur in wenigen Fällen rund um die Uhr verfügbar sein müssen. Dementsprechend

ist zumeist keine hohe Flexibilität, Fahrleistung oder besonders große Reichweite erforderlich (max. ca. 350–400 km). Die Fahrleistungen in diesem Anwendungsfall betragen häufig unter 20.000 Kilometer pro Fahrzeug und Jahr. Ebenso wie die einzelnen teilweise geplanten, in seltenen Fällen jedoch völlig ungeplanten Ad-hoc-Fahrten sind auch die Anzahl der unmittelbar aufeinanderfolgenden Fahrten, das abgesetzte Verweilen am Ereignisort oder die Rückkehr zum Heimatstandort zumeist planbar. Darüber hinaus werden die hier beschriebenen Fahrzeuge ebenfalls mehrfach täglich von wechselnden Nutzern gefahren. Die Fahrzeuge sind in der Regel mit zusätzlichen (polizeilichen) Sondereinbauten ausgestattet und verfügen über Nebenverbraucher wie Sondersignalanlagen, Funk etc. Fahrzeuge in diesem Anwendungsfall werden gelegentlich auch im Anwendungsfall ESD eingesetzt, müssen also den Anforderungen von mehreren Anwendungsfällen gerecht werden.

Aus den erhobenen Fahrdaten ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen der räumlichen Zuordnung der Dienststellen gleicher Aufgabenstruktur. Daher wird im Folgenden zwischen Antrieben statt räumlichen Clustern unterschieden. Im Anwendungsfall KED wurden insbesondere VW eGolf (insgesamt 13 Fahrzeuge), ein Opel Ampera-e sowie ein VW Passat GTE eingesetzt. Zum Vergleich wurden Fahrdaten bei zwei ICV erhoben. Der Passat GTE wurde an einer sogenannten Zentralen Kriminalinspektion (ZKI) verwendet. Eine ZKI bearbeitet größtenteils Delikte der Schwerekriminalität⁴ und weist daher ein spezialisiertes Aufgabenspektrum auf. Das Nutzungsprofil wird dadurch beeinflusst. Die relativ begrenzte Reichweite der eGolf (ca. 230 km nach WLTP) hat ebenfalls einen Einfluss auf die Fahrzeugnutzung. Aus routinemäßig erhobenen Daten aller Fahrzeuge der Flotte der Polizei Niedersachsen wurden die jährlichen Fahrleistungen von ICV in den gleichen Einsatzbereichen der Dienststellen ermittelt. Im Vergleich weisen die BEV tendenziell geringere jährliche Fahrleistungen auf. In ruralen Dienststellen sind die Unterschiede meist deutlicher als in urbanen Dienststellen, bei denen vielfach keine signifikanten Unterschiede zwischen den BEV und ICV festgestellt werden konnten. Gleichzeitig gibt es jedoch auch rurale

⁴ Dazu gehören beispielsweise die Organisierte Kriminalität, Bandenkriminalität, Finanzermittlungen sowie einsatz- und ermittlungsunterstützende operative Maßnahmen.

wie urbane Dienststellen, in denen die BEV höhere jährliche Fahrleistungen als die ICV aufweisen. Inwiefern die relativ stark begrenzte Reichweite der hier betrachteten BEV die Fahrzeugnutzung einschränkt bzw. verändert, hängt daher erheblich von der individuellen Nutzung an der Dienststelle ab. Abbildung 6 zeigt die aus den Fahrdaten ermittelten täglichen Fahrleistungen.

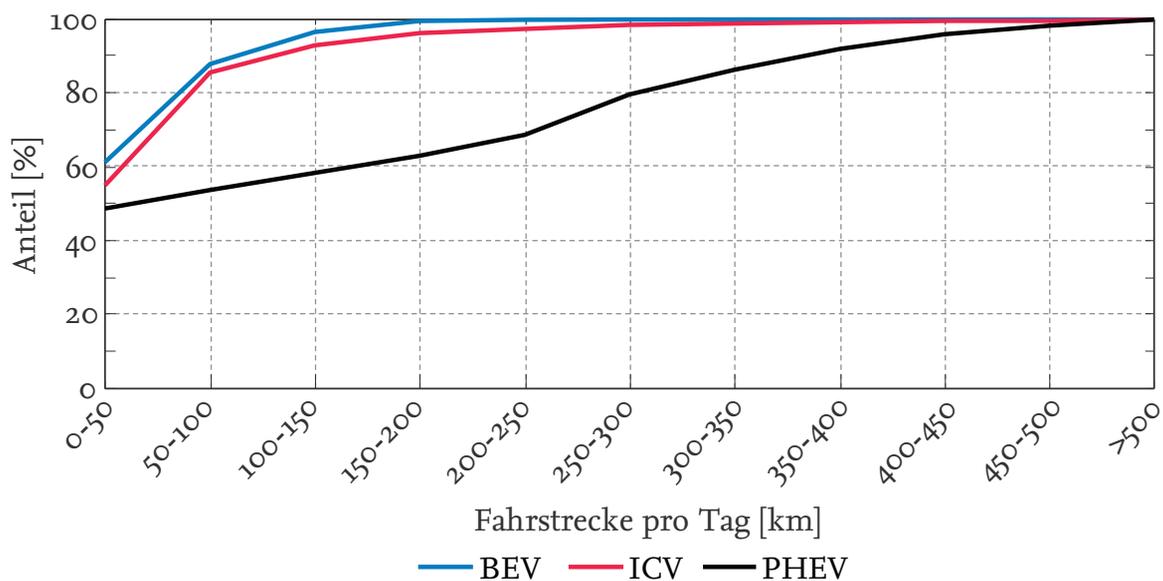


Abbildung 6: Strecke pro Fahrt im KED für die Antriebsarten BEV, ICV und PHEV

BEV und ICV zeigen beide eine häufig eher geringe tägliche Laufleistung, an über 95 % der Tage unter 200 km pro Tag. Beim ICV gibt es auch längere tägliche Fahrstrecken, jedoch mit geringer Häufigkeit. Demgegenüber sind hohe tägliche Fahrleistungen beim PHEV sehr häufig, an ca. 20 % der Tage wurden mehr als 300 km zurückgelegt. Dies ist vor allem auf die Verwendung bei einer Sonderdienststelle zurückzuführen, wodurch häufig auch weiter entfernte Ziele angefahren werden. Hinzu kommt, dass sonst üblicherweise Fahrzeuge der Kompaktklasse eingesetzt werden, wohingegen das PHEV ein Mittelklasse-Fahrzeug ist. Aufgrund des höheren Platzangebots und Fahrkomforts ist außerdem zu erwarten, dass das Fahrzeug auch bevorzugt für Fahrten über lange Strecken genutzt wurde. Abbildung 7 zeigt die Strecke pro Fahrt, wobei eine Fahrt per Definition an der Heimatdienststelle beginnt und endet.

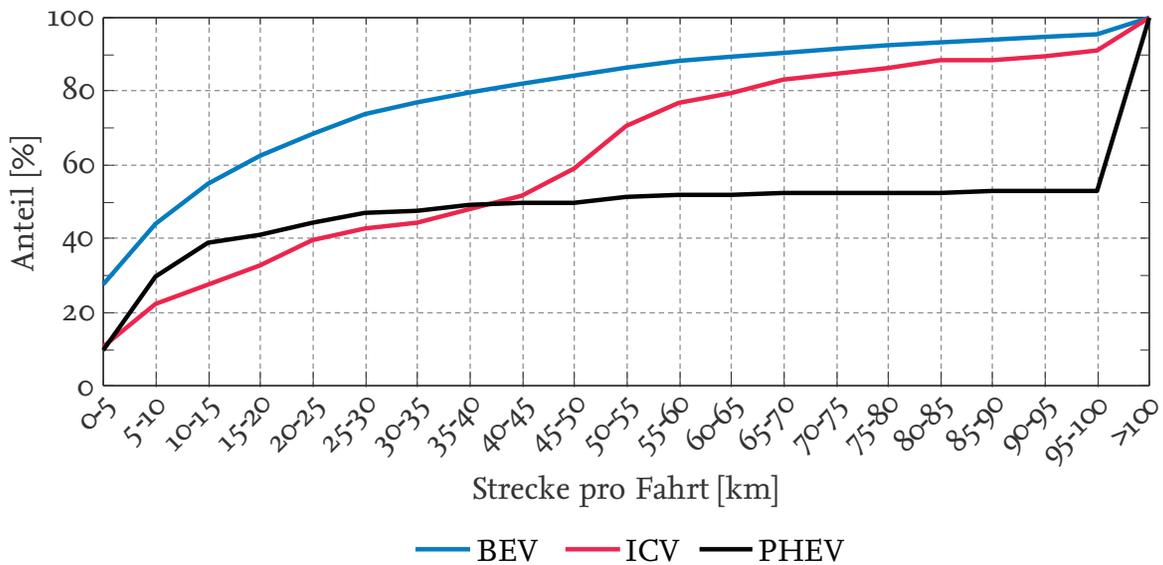


Abbildung 7: Strecke pro Fahrt im KED für die Antriebsarten BEV, ICV und PHEV

Beim PHEV waren fast 50 % aller Fahrten länger als 100 km, sodass sich erneut die intensive Nutzung auf der Langstrecke zeigt. Der Anteil kürzerer Strecken ist bei den BEV höher als bei ICV und PHEV. Fahrten länger als 100 km sind sowohl beim ICV als auch bei den BEV eher selten. Die Standzeit an der Dienststelle zwischen den Fahrten zeigt Abbildung 8.

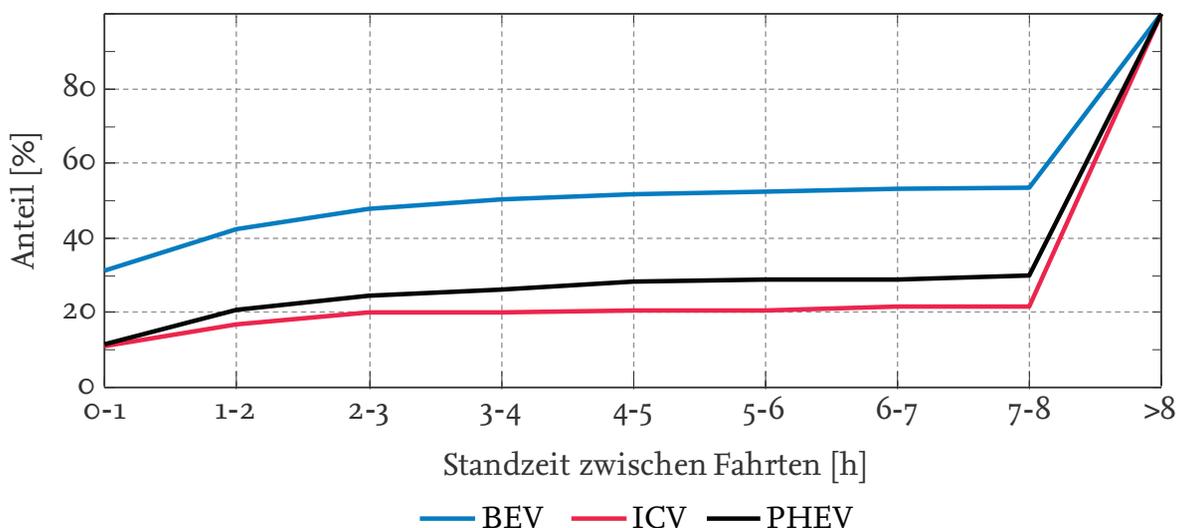


Abbildung 8: Standzeit an der Dienststelle zwischen Fahrten im KED für die Antriebsarten BEV, ICV und PHEV

Die Standzeiten an der Dienststelle sind erheblich länger als im Anwendungsfall ESD. Insbesondere bei ICV und PHEV sind 70–80 % der Standzeiten länger als 8 h. Bei den

BEV beträgt der Anteil von Standzeiten über 8h ca. 50 %. Für alle drei Antriebsarten lässt sich dies vor allem auf Standzeiten über Nacht zurückführen, da im KED vielfach im Einschicht-Betrieb gearbeitet wird. Die BEV weisen darüber hinaus einen vergleichsweise hohen Anteil an Standzeiten unter 3h auf. In Verbindung mit Abbildung 9, welche die Anzahl an täglichen Fahrten darstellt, zeigt sich, dass die BEV häufiger am Tag genutzt werden.

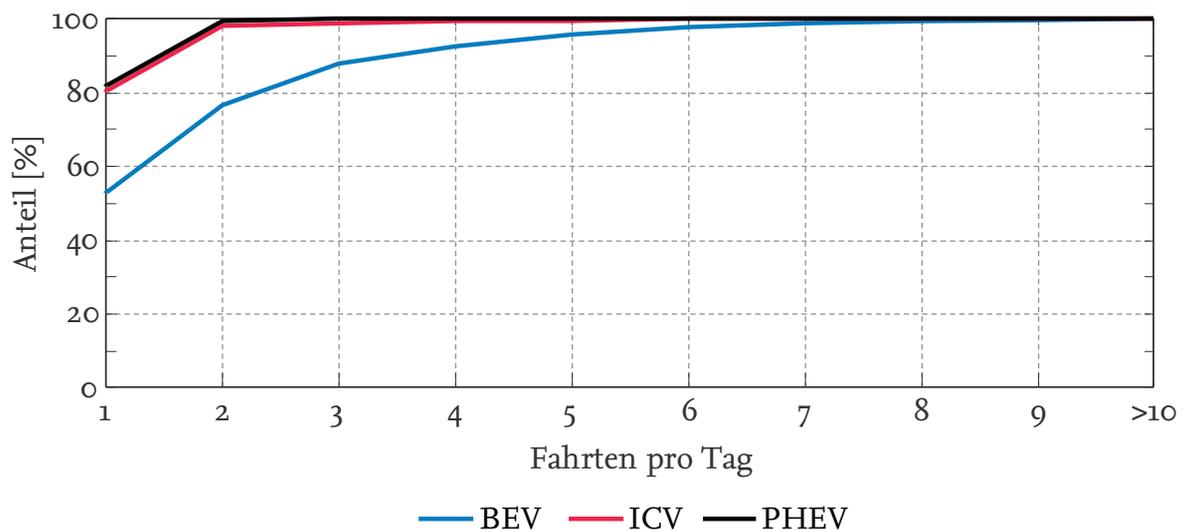


Abbildung 9: Anzahl an Fahrten pro Tag im KED für die Antriebsarten BEV, ICV und PHEV

ICV und PHEV absolvieren nur selten mehr als eine Fahrt am Tag und nur äußerst selten mehr als zwei. Demgegenüber werden die BEV relativ häufig für mehr als vier Fahrten am Tag genutzt. Im Vergleich zum ESD werden erheblich weniger Fahrten am Tag durchgeführt. Mit den vorherigen Betrachtungen zu den Strecken pro Fahrt zeigt sich bei den BEV ein von mehreren kurzen Strecken am Tag geprägtes Fahrprofil, wohingegen das PHEV ein gegensätzliches Profil mit wenigen, dafür langen Fahrten am Tag aufweist.

5.2.3 Stab & Fiskal

Der Anwendungsfall Stab & Fiskal wird als Sammelbegriff für Organisationsbereiche genutzt, die häufig in mittleren bis großen Dienststellen zu finden sind. Hier eingesetzte Fahrzeuge werden in der Regel für administrative Fahrten in einem bestimmten regionalen Bezirk genutzt. Darunter fallen auch Querschnittsaufgaben der Verwaltung und Technik zur Sicherstellung der Dienst- und Fachaufsicht für ihre nachgeordneten Dienststellen-, Organisationseinheiten und -bereiche. Aus- und Fortbildungsfahrten sowie Fahrten zu Besprechungen zählen ebenfalls dazu. Auch Poolfahrzeuge aus diesem Anwendungsfall werden gelegentlich im Anwendungsfall ESD oder KED eingesetzt, müssen also nach Defekten oder Unfällen den Anforderungen von mehreren Szenarien gerecht werden. Eine weitere Unterteilung der Organisationsformen und Anbindungen wurde aus Gründen der Vereinfachung nicht vorgenommen.

Im Bereich Stab & Fiskal wurden nur bei BEV Daten aufgezeichnet. Verwendet wurden zwei Opel Ampera-e sowie sechs VW eGolf und ein BMW i3. Aus den erhobenen Fahrdaten ergaben sich wie auch beim Anwendungsfall KED keine signifikanten Unterschiede zwischen der räumlichen Zuordnung der Dienststellen. Daher wurde hier eine Unterteilung in BEV₂₃₀ (VW eGolf und BMW i3, beide ungefähr 230 km Reichweite) und BEV₄₂₀ (Opel Ampera-e, 420 km Reichweite) vorgenommen. Wie im Anwendungsfall KED wurden auf Basis der routinemäßig erhobenen Daten aller Fahrzeuge der Flotte der Polizei Niedersachsen, die jährlichen Fahrleistungen von ICV in den gleichen Einsatzbereichen der Dienststellen ermittelt. Zwischen BEV und ICV gibt es auch in diesem Anwendungsfall zum Teil erhebliche Unterschiede. Jedoch sind diese zwischen ICV und BEV₄₂₀ erheblich geringer bzw. nicht signifikant, woraus sich schließen lässt, dass die BEV₄₂₀ den Mobilitätsbedarf im Bereich Stab & Fiskal bereits sehr gut erfüllen.

Abbildung 10 zeigt die aus den Fahrdaten ermittelte tägliche Fahrleistung für BEV₂₃₀ und BEV₄₂₀.

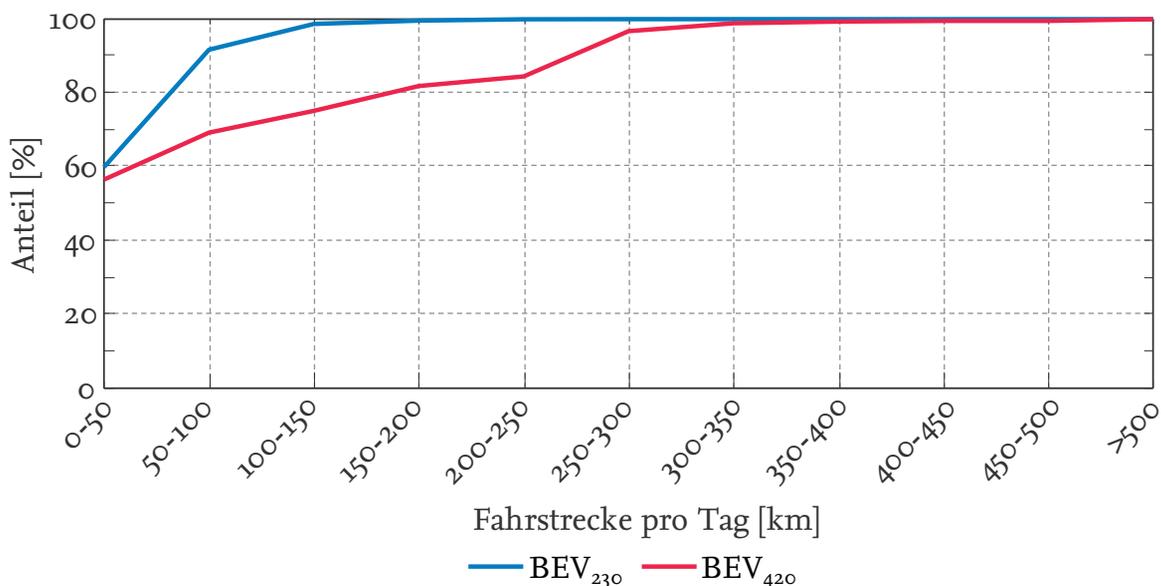


Abbildung 10: Tägliche Fahrstrecke im Bereich Stab & Fiskal für BEV₂₃₀ und BEV₄₂₀

Bei beiden Modellen wurden an mehr als der Hälfte aller Tage im Betrachtungszeitraum weniger als 50 km zurückgelegt. Beim BEV₄₂₀ wurden jedoch auch oft erheblich längere tägliche Fahrstrecken absolviert, als mit den BEV₂₃₀. Bei den BEV₂₃₀ wurden an über 99 % aller Tage weniger als 200 km zurückgelegt. Demgegenüber wurden bei den BEV₄₂₀ an etwa 20 % der Tage mehr als 200 km gefahren. Abbildung 11 zeigt die Strecken pro Fahrt, mit Beginn und Ende an der Heimatdienststelle.

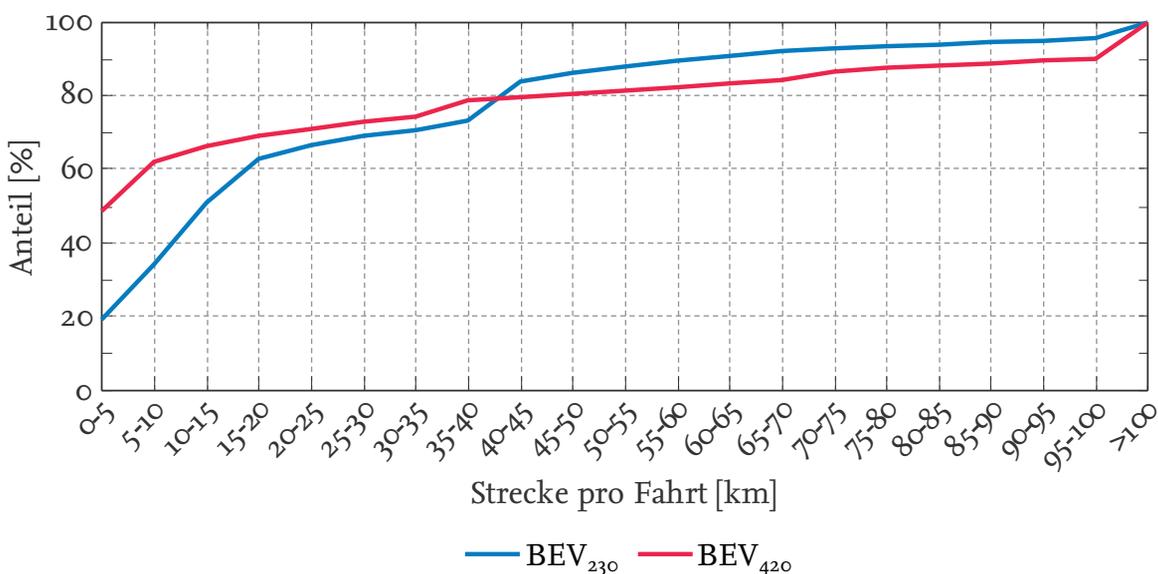


Abbildung 11: Strecke pro Fahrt im Bereich Stab & Fiskal für BEV₂₃₀ und BEV₄₂₀

Grundsätzlich sind die Strecken pro Fahrt relativ ähnlich, wobei beim BEV₄₂₀ sehr kurze (kleiner als 10 km) und längere Strecken (größer 50 km) häufiger vorkommen, als beim BEV₂₃₀, bei welchem Strecken zwischen 5 und 50 km besonders häufig sind. Die Standzeiten an der Dienststelle zwischen den Fahrten zeigt Abbildung 12.

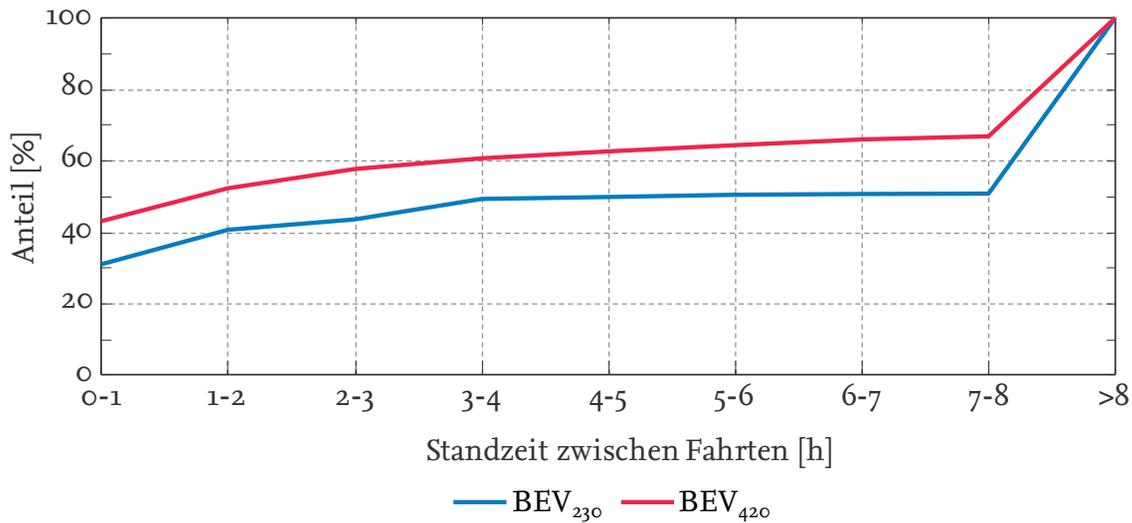


Abbildung 12: Standzeit an der Dienststelle zwischen Fahrten im Bereich Stab & Fiskal für BEV₂₃₀ und BEV₄₂₀

Wie beim Anwendungsfall KED gibt es einen relativ hohen Anteil an Standzeiten, die länger als acht Stunden dauern. Auch hier sind es vorwiegend Standzeiten über Nacht, welche aus dem Ein-Schicht-Betrieb resultieren. Beim BEV₄₂₀ ist der Anteil kurzer Standzeiten höher. Mit Abbildung 13, welche die Anzahl der Fahrten pro Tag zeigt, ergibt sich, dass die kürzeren Standzeiten Folge einer deutlich höhere Anzahl an Fahrten am Tag sind.

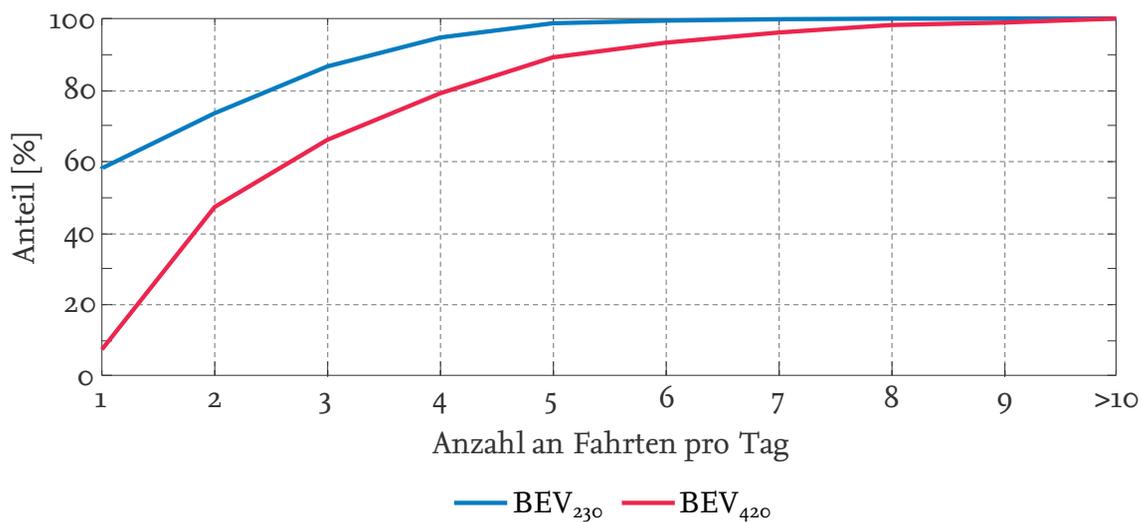


Abbildung 13: Anzahl an Fahrten pro Tag im Bereich Stab & Fiskal für BEV₂₃₀ und BEV₄₂₀

5.2.4 Zusammenfassung

Aus den vorherigen Betrachtungen folgt, dass die Anwendungsfälle KED sowie Stab & Fiskal (bzw. vergleichbare Anwendungsfälle) geprägt sind von häufigen längeren Standzeiten, die zum Laden genutzt werden können sowie moderaten Fahrtstrecken. Außerdem ist bei Fahrten über lange Strecken eine Pause zum Nachladen in der Regel möglich. Folglich eignen sie sich besonders gut für den Einsatz von BEV. Der Anwendungsfall ESD bzw. vergleichbare Bereiche mit hohen Anforderungen an die Verfügbarkeit der Fahrzeuge durch Sofortlagen oder ähnliches ist charakterisiert von häufigen Fahrten und kurzen Standzeiten. Je nach räumlicher Struktur bzw. Zuständigkeitsgebiet sind die Strecken dabei eher kurz (ESD urban) oder sehr lang (ESD extra rural und BAB). Die Verwendung von BEV ist auch in solchen Anwendungsfällen möglich. Die erforderlichen technischen Anforderungen an Fahrzeuge werden in Abschnitt 7.1.1 dargelegt.

II. Zentrale Ergebnisse und Handlungsempfehlungen

6 Entscheidungsunterstützung und Rahmenbedingungen

Die Flotte der Polizei ist durch einen heterogenen Fuhrpark mit hohen Anforderungen gekennzeichnet. Je nach Mobilitätsanforderung sind Anzahl, Fahrzeugsegment, Ausstattungsstandards und -optionen festzulegen. Die Erhöhung des Elektrifizierungsgrades innerhalb der Flotte bedarf politischer Unterstützung. Aus diesem Grund beleuchtet dieser Abschnitt strategische Fragestellungen und langfristige Planungen insbesondere für den Adressatenkreis der strategischen Entscheidungstragenden aus Politik und Verwaltung. Im Rahmen dieses Abschnitts sollen die zuständigen (Landes-) Ministerien und Verwaltungsorgane über das strategische Vorgehen bei der Elektrifizierung von behördlichen Fahrzeugflotten informiert und hinsichtlich strategischer Entscheidungen unterstützt werden. Neben Bundes- und Landesministerien werden auch ihnen nachgeordnete Bereiche adressiert.

6.1 Bezugsrahmen

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der Dekarbonisierung des Straßenverkehrs stehen strategische Entscheidungstragende aus Politik und Verwaltung bei der Strategiefestlegung sowie der Beschaffung von Fahrzeugen und Infrastruktur vor großen Herausforderungen. Entscheidungstragende befinden sich zunehmend in einem komplexen Spannungsfeld mit verschiedensten Einflussgrößen, welches über die Bereiche Markt und Umwelt, Fahrzeug- und Infrastrukturanbieter sowie Politik und Gesetzgebung, stets unter der Berücksichtigung von zahlreichen Interdependenzen und Unsicherheiten, aufgespannt wird (vgl. Abbildung 14).⁵ Die Planung eines Fuhrparks erfordert daher ein umfangreiches Systemverständnis, um die Folgen möglicher Entscheidungen sowie gegenseitige Abhängigkeiten und Wechselwirkungen analysieren und abschätzen zu können.

⁵ Die nachfolgenden Ausführungen lehnen sich eng an Schmidt et al. (2020) an.

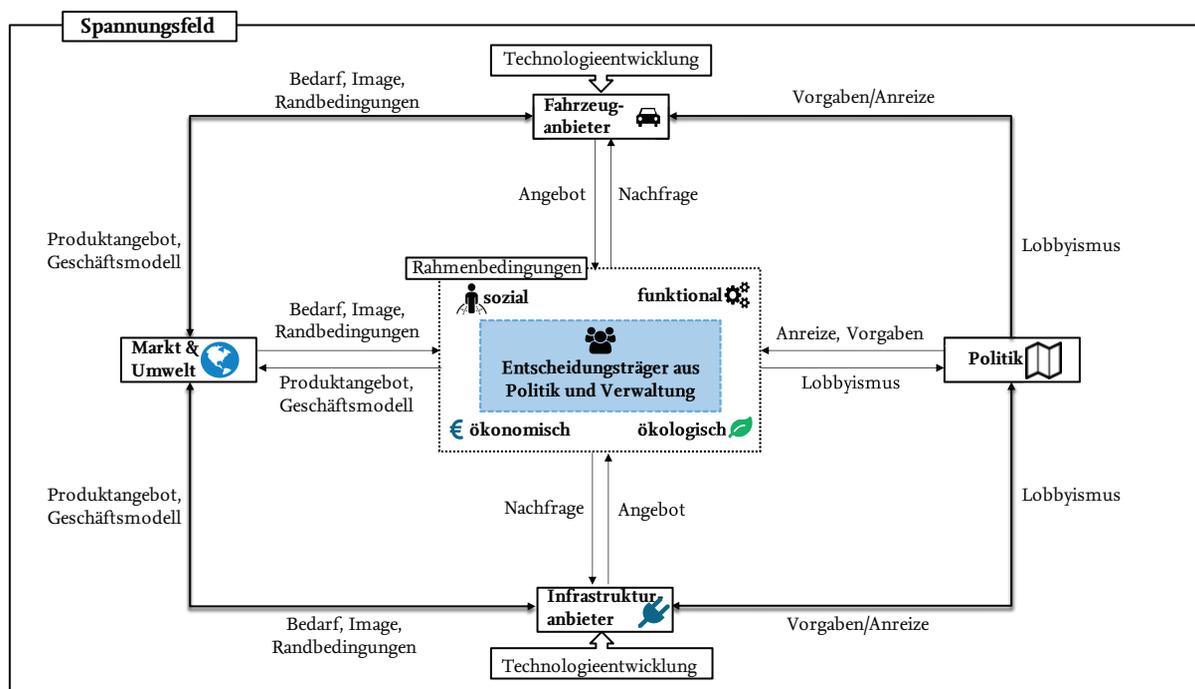


Abbildung 14: Spannungsfeld für Entscheidungsträger aus Politik und Verwaltung

Im Zentrum der Betrachtungen (inneres Spannungsfeld) stehen die Entscheidungsträger aus Politik und Verwaltung, welcher unter gegebenen Rahmenbedingungen dafür sorgen sollen, dass die Fahrzeugflotte aus sozialer, funktionaler, ökonomischer und ökologischer Sicht bestmöglich betrieben wird. Sie können dabei entweder selbst Bestandteil der die Flotte betreibenden Organisation sein oder über Drittanbieter eingebunden werden. Besonders hervorzuheben sind dabei die sozialen Anforderungen an die Flottenplanung. Darüber hinaus nimmt die Nutzerakzeptanz einen hohen Stellenwert bei der Planung von Flotten ein. Aktuell existieren viele Hemmnisse und Ängste bei Fahrzeugnutzenden hinsichtlich des Einsatzes von EV. Insbesondere aufgrund der geringen Reichweite von EV stehen viele Nutzende den neuen Antriebstechnologien mit Skepsis gegenüber. Der Überzeugungsaufwand, den Entscheidungsträger bei der Beschaffung von EV gegenüber nachgeordneten Institutionen, Organisationen oder Organisationsbereichen leisten muss, ist enorm und beeinflusst wesentlich die Entscheidungen.

Das (äußere) Spannungsfeld reicht über die Bereiche Markt und Umwelt, Fahrzeug- und Infrastrukturanbieter sowie Politik. Markt und Umwelt fungieren als zentrale Anspruchsgröße der Organisation. Sie definieren den Bedarf, auf welchen sie durch ein

entsprechendes Geschäftsmodell bzw. Produktangebot reagiert. Hieraus resultiert die zentrale Motivation für den Flottenbetrieb. Weiterhin werden die Randbedingungen (z. B. Marktanforderungen) an eine Organisation festgelegt. Infrastruktur- und Fahrzeuganbieter stellen das Angebot an Flottenfahrzeugen sowie der für deren Betrieb ggf. erforderlichen (Lade-) Infrastruktur. Diese werden von Entscheidungstragenden entsprechend nachgefragt. Das Angebot hängt maßgeblich von der technologischen Entwicklung in den jeweiligen Bereichen sowie analog zu Flottenbetreibern vom Bedarf ab, welcher seitens des Marktes vorgegeben wird. Die Politik und Gesetzgebung setzt die politischen Rahmenbedingungen, sowohl im Hinblick auf Fahrzeug- und Infrastrukturanbieter als auch auf die Organisation. Sie macht Vorgaben und setzt Anreize mit dem Anspruch, politische Zielvorgaben zu erreichen. Diese können seitens der Anbieter und Flottenbetreibenden über eine erfolgreiche Lobbyarbeit beeinflusst werden.

Der skizzierte Bezugsrahmen offenbart, dass die Planung von Fahrzeugflotten sowie der zugehörigen Infrastruktur und die Festlegung einer langfristigen Strategie zur Beschaffung von Flottenfahrzeugen unter vielfältigen, unsicheren, im Wesentlichen exogen vorgegebenen Rahmenbedingungen erfolgt. Vor allem erschweren die vielfältigen dezentralen Entscheidungen und konfliktären Zielstellungen den Entscheidungsprozess, um eine optimalen Strategie zur Beschaffung von Fahrzeugen zu wählen. Strategische Entscheidungstragende aus Politik und Verwaltung stehen somit bei der Festlegung einer Strategie sowie der Beschaffung von Fahrzeugen und Infrastruktur vor der großen Herausforderung der adäquaten Berücksichtigung der zahlreichen Interdependenzen und Unsicherheiten. Die Planung erfordert ein umfangreiches Systemverständnis, um die Folgen möglicher Entscheidungen sowie gegenseitige Abhängigkeiten, z. B. in Bezug auf Flottenalterung, Haushaltsfragen und technische Entwicklungen, systematisch analysieren und abschätzen zu können.

Fazit: Flottenplanung ist eine komplexe Aufgabe. Die Entscheidungen von strategischen Planenden werden von unsicheren Einflussfaktoren und externen Akteuren am Markt beeinflusst, die im Rahmen strategischer Entscheidungsprozess in geeigneter Weise berücksichtigt werden müssen.

6.2 Rahmenbedingungen strategischer Entscheidungen

In den nachfolgenden Abschnitten werden die entscheidungsrelevanten Bereiche des in Abschnitt 6.1 aufgespannten Bezugsrahmens sukzessive vorgestellt. Insbesondere werden hierzu umweltpolitische, rechtliche, haushalterische und ökologische und Rahmenbedingungen beleuchtet, um die folgenden Fragestellungen für strategische Entscheidender zu beantworten:

- „Wie wirkt sich das Marktangebot der Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturanbieter auf die Entscheidungen von Flottenplanenden und -betreibenden aus?“
- „Welche umweltpolitischen Rahmenbedingungen beeinflussen die Entscheidungen von Flottenplanenden und -betreibenden aktuell und in absehbarer Zukunft?“

Zur Beantwortung der Leitfragen werden zunächst ausgewählte Hinweise zu bereits bestehenden oder erwarteten gesetzlichen und umweltpolitischen Rahmenbedingungen sowie Absichtserklärungen, die strategische Entscheidungstragende aus Politik und Verwaltung in ihrer Entscheidung maßgeblich beeinflussen, vorgestellt. Es folgt die Darstellung der aktuellen bzw. erwarteten zukünftigen Marktsituation der Fahrzeuganbieter und der Ladeinfrastrukturanbieter.

6.2.1 Umweltpolitik und rechtliche Grundlagen

Nachfolgend werden kurz die wichtigsten Randbedingungen aus umweltpolitischer Sicht erläutert, von der europäischen Ebene bis hin zur Landesebene, die strategische Entscheidungstragende aus Politik und Verwaltung in ihrer Entscheidung maßgeblich beeinflussen.

European Green Deal

Der im Dezember 2019 vorgestellte European Green Deal reflektiert auf die Treibhausgasemissionen und sieht eine Reduzierung der Netto-Emissionen auf null bis 2050 vor. Damit wäre die EU der erste klimaneutrale Kontinent⁶.

⁶ Vgl. EC (2019).

EU-Flottengrenzwerte

Bis 2021 darf nach (EG) Nr. 443/2009 der Durchschnitt aller neu zugelassenen Pkw eines Herstellers in der EU im Schnitt maximal 95 g CO₂/km ausstoßen. Dies entspricht einem durchschnittlichen Verbrauch von 3,6 Liter Diesel bzw. 4,1 Liter Benzin pro 100 km. Der Grenzwert ist abhängig vom Fahrzeuggewicht, sodass schwerere Fahrzeuge höhere CO₂-Emissionen aufweisen dürfen. Ab 2025 wird der Flottengrenzwert durch die Verordnung (EU) 2019/631 weiter angepasst und sieht eine verbindliche Verringerung des CO₂-Ausstoßes um 15 % bis 2025 und um 37,5 % bis 2030 vor⁷. Schon die aktuellen Vorgaben mit max. 95 g sind mit ICV allein nicht zu erreichen. Eine immer stärker voranschreitende Elektrifizierung des Fahrzeugangebotes ist die Folge. Zu den Treibhausgasen zählen gemäß dem Kyoto-Protokoll folgende Stoffe: Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (Lachgas/N₂O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC) und Schwefelhexafluorid (SF₆)⁸.

Ziele der Bundesregierung

Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis zum Jahr 2020 um 40 %, bis 2030 um 55 %, bis 2040 um 70 % und bis 2050 um 80 bis 95 % zu reduzieren (jeweils bezogen auf das Basisjahr 1990)⁹. Emissionen dieser Gase entstehen vorwiegend, wenn fossile Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas verbrannt werden. Mehr als 80 % der deutschen Treibhausgasemissionen sind energiebedingt und stammen im Wesentlichen aus Energiewirtschaft, Gebäude und Verkehr. Verfehlt Deutschland das nächste Etappenziel im Klimaschutz, die Treibhausgasemissionen bis 2020 um mindestens 40 % gegenüber 1990 zu senken, gefährdet dies auch das Erreichen der nachfolgenden Zielsetzungen für die Jahre 2030, 2040 und 2050. Mit dem am 3. Dezember 2014 beschlossenen „Aktionsprogramm Klimaschutz 2020“ hat die Bundesregierung deshalb zusätzliche Maßnahmen beschlossen, um das 2020-Ziel

⁷ Vgl. EU (2019).

⁸ Vgl. UNFCCC (2008).

⁹ Vgl. BREG (2018).

zu erreichen¹⁰. Das Programm soll ermöglichen, dass Deutschland den Umfang seiner Treibhausgasemissionen von rund 1.250 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten im Jahr 1990 bis 2020 um 40 % mindert – auf höchstens 750 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente. Mit dem im November 2016 verabschiedeten Klimaschutzplan 2050 hat die Bundesregierung ihre nationalen Klimaschutzziele bestätigt und weiter präzisiert. Deutschlands anspruchsvolles Langfristziel ist es, bis 2050 weitgehend treibhausgasneutral zu werden¹¹.

Landes-Rahmenbedingungen

Das Land Niedersachsen plant den Klimaschutz in die Verfassung aufzunehmen und berät derzeit über die Verabschiedung eines Klimagesetzes (NKlimaG)¹². Im aktuellen Entwurf sieht dieses einen Paragraphen zur klimaschonenden Mobilität vor. In Absatz IV des Entwurfes heißt es:

„Bei Neu- und Ersatzbeschaffungen von Fahrzeugen des Landes ist der Anteil von Fahrzeugen mit klimaschonenden Antrieben und die Nutzung klimaschonender Treibstoffe kontinuierlich und dauerhaft im Zuge des weiteren technologischen Fortschritts bis zum Jahr 2030 zu erhöhen. Ab 2030 sollen unter Berücksichtigung der technologischen Entwicklung ausschließlich Fahrzeuge mit klimaschonenden Antrieben beschafft werden.“ Allerdings sieht die Klausel derzeit eine Ausnahmeregelung für Spezialfahrzeuge vor.

Fazit: Im Ergebnis bleibt festzustellen, dass die gesetzlichen Rahmenbedingungen ein alleiniges Festhalten an ICV nicht zulassen. Klimaschutzvorgaben werden schrittweise verschärft und zwingen Fahrzeughersteller die Elektrifizierung des Antriebsstranges voranzutreiben. Zwar existieren z. B. für die Polizei Niedersachsen derzeit noch keine konkreten gesetzlichen Vorgaben, die zu einer (Teil-) Elektrifizierung der Flotte zwingen, diese sind aber in naher Zukunft sehr wahrscheinlich und sollten aufgrund ihrer erheblichen Auswirkungen bedacht und zeitgerecht vorbereitet werden.

¹⁰ Vgl. BMU (2014).

¹¹ Vgl. BMU (2016).

¹² Vgl. NKlimaG (2020).

6.2.2 Marktangebot und technische Entwicklungen

Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturanbieter stehen vor großen Herausforderungen. Neben politischen Vorgaben stehen die zunehmende Komplexität, neue Fahrzeugkonzepte und technische Entwicklungen im Vordergrund. In den folgenden Abschnitten wird die aktuelle und zu erwartende Marktsituation der Fahrzeuganbieter und der Ladeinfrastrukturanbieter vorgestellt und erläutert.

Fahrzeuganbieter

Die EU-Flottengrenzwerte für CO₂ können mit ICV allein nicht erfüllt werden, weshalb in den kommenden Jahren eine vollständige Elektrifizierung des Fahrzeugangebots der Hersteller erfolgen dürfte. Diverse Hersteller haben bereits angekündigt, dass sie spätestens ab 2030 nur noch mindestens Mild-Hybrid-Fahrzeuge (MHEV), welche den geringsten Elektrifizierungsgrad von Neufahrzeugen darstellen, in Europa anbieten werden und haben Prognosen für die Anteile verschiedener Antriebe an ihren Neufahrzeugen veröffentlicht. Beispielsweise erwartet Mercedes-Benz für 2030 in etwa gleiche Anteile von MHEV, PHEV und BEV, BMW 50 % BEV und PHEV sowie 50 % MHEV. Volkswagen wiederum rechnet in Europa für 2025 mit mehr als 25 % BEV und für 2040 mit einem Anteil von ca. 70 % BEV sowie jeweils 10–20 % PHEV und Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieben (FCEV). Ferner wird durch neue Abgasgrenzwerte (EURO7 und folgende) sowie die CO₂-Flottengrenzwerte die Nutzung von Verbrennungsmotoren in einigen Segmenten, insbesondere bei kleineren Fahrzeugen, für Hersteller unwirtschaftlich, sodass das Angebot in einigen Fahrzeugkategorien voraussichtlich nur noch BEV umfassen wird. Bis 2025 sind bereits mehr als 270 neue BEV-Modelle von verschiedensten, etablierten Herstellern angekündigt. Außerdem gibt es zunehmend neue Hersteller, welche ebenfalls Fahrzeuge angekündigt oder bereits auf dem Markt haben. In den kommenden Jahren werden BEV in allen Pkw-Segmenten verfügbar sein.

Bilanziell CO₂-neutrale Kraftstoffe, basierend auf Biomasse sowie synthetische Kraftstoffe hergestellt mit CO₂ (z. B. gewonnen aus der Atmosphäre) und regenerativ erzeugtem Wasserstoff (sogenannte e-Fuels), sind fast ausschließlich in Bereichen zu erwarten, bei denen eine Elektrifizierung nicht möglich ist, beispielsweise in der Luft- und Schiff-

fahrt sowie zum Teil bei schweren LKW. Klassische Biokraftstoffe stehen jedoch zu Nahrungsmitteln in Konkurrenz. E-Fuels wiederum sind bisher mit Produktionskosten von ca. 4,50 €/l vergleichsweise sehr teuer. Perspektivisch (bis 2050) ist eine Produktion in Staaten mit günstigeren Produktionsbedingungen (hohe Verfügbarkeit erneuerbarer Energie, insbesondere Nordafrika und Naher Osten, teilweise Skandinavien) wahrscheinlich. In diesem Fall werden Produktionskosten von ca. 1–2 €/l erwartet. Da die genannten alternativen Kraftstoffe auch zukünftig mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht auf die Flottenemissionen der Hersteller angerechnet werden, ist eine flächendeckende Verbreitung für Pkw im Hinblick auf das langfristige Fortbestehen von konventionellen Antrieben nicht zu erwarten. FCEV als Alternative zu BEV werden in größerer Stückzahl erst nach 2030 erwartet. Der Einsatz wird auch hier überwiegend bei großen und schweren Fahrzeugen erfolgen, insbesondere auch bei schweren Nutzfahrzeugen.

Bei BEV wird analog zu heutigen ICV eine Diversifizierung des Antriebs erfolgen, sodass bei gleichem Modell unterschiedliche Antriebsleistungen sowie Batteriekapazitäten wählbar sein dürften. Dabei sind Varianten mit Reichweiten von deutlich mehr als 500 km in den gesetzlichen Verbrauchszyklen zu erwarten. Bei PHEV wird es voraussichtlich ebenfalls mehrere Leistungsstufen geben und die elektrische Reichweite wird signifikant gesteigert, auf mehr als 100 km. Die AC-Ladeleistung bei BEV wird 11 kW mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht überschreiten, bei DC-Ladung werden Leistungen von deutlich über 100 kW möglich sein, derzeit sogar bis zu 350 kW Ladeleistung bei Pkw. Bei PHEV könnte mit zunehmender Batteriekapazität bzw. elektrischer Reichweite eine DC-Ladung mit vergleichsweise geringerer Leistung (kleiner 50 kW) verfügbar sein, einzelne Hersteller haben bereits erste Fahrzeuge in Serie. Neben dem konduktiven Laden werden auch induktive Ladesysteme verfügbar sein. Es sind ebenfalls Leistungen bis 11 kW zu erwarten, entsprechende Systeme sind bereits angekündigt.

Infrastrukturanbieter

In Zukunft kann damit gerechnet werden, dass die LIS mit der Weiterentwicklung der Technologie und der steigenden Konkurrenz günstiger wird. Parallel werden weitere Funktionen aus der ISO 15118, wie die Übertragung des State of Charge (SoC) der Fahrzeuge umgesetzt. Mit der Aufnahme des SoC und der Weiterleitung dessen an ein Lade- bzw.

Energiemanagement, kann eine SoC abhängige Ladesteuerung umgesetzt werden. Mit den zunehmenden Funktionen der Ladesäule bzw. den Fahrzeugen im Zusammenspiel mit den Ladesäulen können Konzepte wie das Vehicle to Grid (V2G), Vehicle to Home (V2H) und Vehicle to Vehicle (V2V) umgesetzt werden. In Zusammenhang mit einem Lade- und Energiemanagement sowie einer PV-Anlage kann das V2G- und V2H-Konzept durch die Nutzung der Elektrofahrzeugbatterie als Speicher Kosten und CO₂-Emissionen einsparen. Die Option V2V kann eine wichtige Funktion bei Einsätzen werden bzw. in Ausnahmesituationen um z. B. den Ladezustand eines Einsatzfahrzeugs während eines Einsatzes mit Hilfe eines anderen EV zu erhöhen. In Verbindung mit Lademanagement, erneuerbaren Energien und Prognosedaten (z. B. Energieerzeugung oder Fahrzeiten) kann ein Optimierungsalgorithmus die optimale Ladezeit und Ladeleistung für jedes EV der Flotte bestimmen. Somit kann besonders effizient, kostengünstig oder CO₂-neutral geladen werden. Ladesäulen und EV werden zukünftig mit der Möglichkeit des Plug and Charge verkauft. Mit dieser Option werden Fahrzeuge ohne die Nutzung weiterer Autorisierungsfunktionen durch das Einstecken des Ladekabels registriert werden. Damit kann Zeit beim Starten des Ladevorgangs gespart werden. An Autobahnen bieten sich bereits heute vereinzelt die Möglichkeiten EV mit bis zu 350 kW zu laden. Die Umsetzbarkeit in den EV und die flächendeckende Umsetzung wird noch einige Jahre benötigen. Die Nutzung kann in besonders anspruchsvollen Anwendungsfällen, wie beispielsweise der Autobahnpolizei, eine Option darstellen.

Fazit: Im Ergebnis bleibt festzustellen, dass das Marktangebot und die Technologieentwicklung von Fahrzeugen und der LIS die Entscheidungen von Flottenplanern heutzutage und in Zukunft beeinflussen können. Es ist zu erwarten, dass der Elektrifizierungsgrad der Flotte weiter ansteigt, da sich in den kommenden Jahren das Produktportfolio der Automobilhersteller weiterhin tiefgehend verändert und die Technologieentwicklung voranschreiten wird. So wird auch der Flottenplaner einer behördlichen Flotte durch die Markteinführung von innovativen Antriebskonzepten und politischen Interventionen in seinem Entscheidungsraum beeinflusst.

6.3 Bewertung unterschiedlicher Beschaffungsstrategien

Vor dem Hintergrund einer sich verschärfenden Umweltgesetzgebung und der damit einhergehenden, nahezu vollständigen Elektrifizierung des Fahrzeugangebots der Hersteller, stellt sich für strategische Entscheidende die Frage nach einer zukünftigen Strategie im Hinblick auf die Zusammensetzung des eigenen Fuhrparks mit dem Schwerpunkt der Nutzung alternativer Antriebstechnologien. Im Vordergrund stehen die folgenden Leitfragen, die im nachfolgenden Verlauf beantwortet werden:

- „Wie wirken sich die Marktentwicklungen seitens der Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturanbieter sowie der umweltpolitischen Rahmenbedingungen auf das Beschaffungsverhalten strategischer Entscheidender und den jährlichen Haushaltsmittelbedarf aus?“
- „Wie wirken sich die Marktentwicklungen seitens der Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturanbieter sowie der umweltpolitischen Rahmenbedingungen auf die Treibhausgasemissionen aus?“

Verschiedene Beschaffungsstrategien können bei unterschiedlichen zukünftigen Marktentwicklungen zu unterschiedlichen Haushaltsmittelausgaben und Umweltwirkungen führen. Zur Beantwortung der Fragestellungen werden daher unterschiedliche Beschaffungsstrategien und Szenarien vorgestellt und haushalterische sowie ökologische Auswirkungen analysiert.

6.3.1 Beschaffungsstrategien und Szenarien

Für den vorliegenden Leitfaden wurden exemplarisch fünf mögliche Beschaffungsstrategien hinsichtlich des zukünftigen Ausbaus der Elektromobilität in einer polizeilichen Flotte für den Betrachtungszeitraum 2020 bis 2030 erarbeitet und mit dem Erhalt des Status Quo verglichen. Die Ausbaustrategien variieren dabei hinsichtlich des Anteils der jährlich zu tätigen Ersatzbeschaffungen von ICV sowie EV. Entsprechend der sich im Betrachtungszeitraum (2020–2030) verändernden politischen und marktseitigen Rahmenbedingungen (vgl. Abschnitte 6.2.1 und 6.2.2) wurden darüber hinaus bei der Variation der Anteile innerhalb einer Strategie zwei Zeiträume betrachtet (2020–2025 und 2026–2030). Die unterschiedlichen Strategien werden im Folgenden näher beschrieben.

Beschaffungsstrategien

1. **Recht:** Im Rahmen der Strategie „Recht“ orientieren sich die Anteile der EV an den jährlich zu tätigen Ersatzbeschaffungen an den derzeit existierenden sowie den zu erwartenden (gesetzlichen) Bestimmungen. In Anlehnung an Ziffer 8 der Koalitionsvereinbarung für die 18. Wahlperiode des Niedersächsischen Landtages 2017–2022 werden 10 % der zu tätigen Ersatzbeschaffungen an ICV durch EV ersetzt. Entsprechend des im Jahr 2019 in der Polizei Niedersachsen vorliegenden Verhältnisses zwischen PHEV und BEV entfallen davon 5 % auf PHEV sowie 5 % auf BEV. Bereits vorhandene BEV und PHEV werden antriebsgleich ersetzt.

Für den Zeitraum ab 2026 bis 2030 ist zukünftig mit einer Verschärfung der gesetzlichen Bestimmungen zu rechnen. So wurde zum Beispiel in der Niedersächsischen Landesregierung die Forderung nach einem Anteil von alternativen Antrieben von 30 % bei der Neu- und Ersatzbeschaffung von Fahrzeugen in behördlichen Flotten diskutiert. In Anlehnung daran werden 30 % der zu tätigen Ersatzbeschaffungen an ICV durch EV ersetzt. Davon entfallen 10 % auf PHEV sowie 20 % auf BEV. Bereits vorhandene BEV und PHEV werden antriebsgleich ersetzt.

2. **CO₂:** Im Rahmen der Strategie „CO₂“ orientieren sich die Anteile der EV an den jährlich zu tätigen Ersatzbeschaffungen an dem Ziel der Bundesregierung bis zum Jahr 2030 40 % der CO₂-Emissionen im Vergleich zum Jahr 1990 einzusparen. Zur Erreichung dieses Zieles wäre es bis zum Jahr 2030 nötig, jährlich 80 % der ICV durch EV zu ersetzen. Davon entfallen 20 % auf PHEV sowie 60 % auf BEV. Bereits vorhandene BEV und PHEV werden antriebsgleich ersetzt.

3. **PHEV:** Die Anteile der EV an den jährlich zu tätigen Ersatzbeschaffungen im Rahmen der Strategie „PHEV“ orientieren sich an dem derzeitigen, maßgeblich durch Förderprogramme beeinflussten Beschaffungsverhalten. Für den Betrachtungszeitraum 2020 bis 2025 werden im Rahmen der Strategie „PHEV“ 50 % der ICV durch EV ersetzt. Davon entfallen 30 % auf PHEV sowie 20 % auf BEV. Bereits vorhandene BEV und PHEV werden antriebsgleich ersetzt.

Langfristig gesehen (Betrachtungszeitraum 2026 bis 2030) werden 100 % der ICV durch EV ersetzt. Davon entfallen 50 % auf PHEV sowie 50 % auf BEV. Bereits vorhandene BEV und PHEV werden jeweils durch BEV ersetzt.

4. EV extrem: Die Strategie „EV extrem“ setzt sich zum Ziel, den betrachteten Fuhrpark¹³ bis 2030 nahezu vollständig zu elektrifizieren. Die jährlich zu tätigen Ersatzbeschaffungen orientieren sich entsprechend an den im Rahmen des Forschungsprojektes lautlos&einsatzbereit ermittelten oberen Potenzialen für den Einsatz von EV (vgl. Abbildung 15 und Abbildung 16). Die Ergebnisse zeigen, dass bis zum Jahr 2025 nach derzeitigem Stand der Technik bis zu 40 % der betrachteten Fahrzeuge durch BEV sowie 100 % durch PHEV ersetzt werden können.

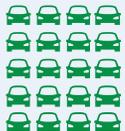
	Einsatz- und Streifendienst	Ermittlungsdienst
 BEV  AC	 20 bis 60 %	 55 bis 90 %
 BEV  DC	 40 bis 70 %	 60 bis 90 %
 PHEV  AC/DC	 100 %	 100 %

Abbildung 15: Übersicht der im Jahr 2018 bestehenden Elektrifizierungspotenziale

¹³ Bei dem betrachteten Fuhrpark handelt es sich um sog. Polizeifahrzeuge des täglichen Dienstes ohne Sonder-/Spezialfahrzeuge.

	Einsatz- und Streifendienst	Ermittlungsdienst
 BEV  AC	 60 bis 80 %	 90 bis 100 %
 BEV  DC	 70 bis 90 %	 100 %
 PHEV  AC/DC	 100 %	 100 %

Abbildung 16: Übersicht der im Jahr 2021 bestehenden Elektrifizierungspotenziale

In Anlehnung daran werden im Rahmen der Strategie „EV extrem“ 100 % der ICV durch EV ersetzt. Davon entfallen 60 % auf PHEV sowie 40 % auf BEV. Bereits vorhandene BEV und PHEV werden antriebsgleich ersetzt.

Für den nachfolgenden Zeitraum ab 2026 bis zum Jahr 2030 ist zukünftig mit einer Erhöhung der Reichweite sowie der Ladeleistung von BEV zu rechnen. In Anlehnung daran werden in diesem Zeitraum 100 % der zu tätigen Ersatzbeschaffungen (ICV sowie EV) durch BEV ersetzt.

5. BEV: Der Einsatz von BEV kann nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch vorteilhaft gegenüber ICV und PHEV sein. Im Rahmen der Strategie „BEV“ wird daher der Fall betrachtet, dass auf den Erwerb von PHEV verzichtet wird und die Anteile der EV an den jährlich zu tätigen Ersatzbeschaffungen vollständig durch BEV gedeckt werden. 20 % der ICV werden im Betrachtungszeitraum 2020 bis 2025 durch BEV ersetzt. Bereits vorhandene BEV werden antriebsgleich, bereits vorhandene PHEV durch ICV ersetzt.

Für den Zeitraum 2026 bis 2030 ist zukünftig mit einer Erhöhung der Reichweite sowie der Ladeleistung von BEV zu rechnen. In Anlehnung daran werden 100 % der zu tätigen Ersatzbeschaffungen (ICV sowie EV) durch BEV ersetzt.

Erhalt Status Quo: Beim Erhalt des Status Quo wird angenommen, dass sich die Anteile an den jährlich zu tätigen Ersatzbeschaffungen von ICV und EV an den derzeitigen Anteilen orientieren. Dies bedeutet, dass bereits vorhandene ICV, BEV und PHEV antriebsgleich ersetzt werden.

Tabelle 4 zeigt die beschriebenen Strategien in Bezug auf die prozentuale Verteilung der jährlich zu tätigen Ersatzbeschaffungen im Überblick.

Tabelle 4: Anteil der Ersatzbeschaffungen in den Strategien

Aussonderung		Anteil der Ersatzbeschaffungen in %										
Fahrzeugart	Fahrzeugart	Strategie 1: Recht		Strategie 2: CO ₂		Strategie 3: PHEV		Strategie 4: EV extrem		Strategie 5: BEV		Erhalt
		2020	2026	2020	2026	2020	2026	2020	2026	2020	2026	
		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2020
		2025	2030	2025	2030	2025	2030	2025	2030	2025	2030	2030
ICV	→ ICV	90	70	20	20	50	0	0	0	80	0	100
	→ PHEV	5	10	20	20	30	50	60	0	0	0	0
	→ BEV	5	20	60	60	20	50	40	100	20	100	0
PHEV	→ ICV	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0
	→ PHEV	100	100	100	100	100	0	100	0	0	0	100
	→ BEV	0	0	0	0	0	100	0	100	0	100	0
BEV	→ ICV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	→ PHEV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	→ BEV	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Für die Analyse der Auswirkungen zukünftiger, unsicherer Entwicklungen auf die jährlichen Haushaltsmittel sowie die Treibhausgasemissionen wurden darüber hinaus drei unterschiedliche Szenarien entwickelt und die für die Berechnungen zugrunde gelegten Daten variiert: das Basisszenario sowie die Szenarien „Contra Elektromobilität“ und „Pro Elektromobilität“. Im Basisszenario wurde von einer moderaten Entwicklung der ökonomischen, ökologischen und flottenspezifischen Daten ausgegangen. Ausgehend vom Basisszenario wurden zwei weitere Szenarien betrachtet. Im Szenario „Pro Elektromobilität“ wurde eine Entwicklung der Daten unterstellt, welche die Beschaffung und den Betrieb von EV begünstigt. Dahingegen wurde im Szenario „Contra Elektromobilität“ eine Entwicklung der Daten unterstellt, welche sich nachteilig auf die Beschaffung und den Betrieb von EV auswirkt.

Hinweis: Die vorgestellten Beschaffungsstrategien wurden exemplarisch unter Beachtung der aktuellen Rahmenbedingungen im Jahr 2020 entwickelt. Sofern sich gesetzliche und marktseitige Änderungen ergeben, sollten die vorgestellten Strategien erneut evaluiert und entsprechend angepasst werden.

6.3.2 Haushalterische Auswirkungen

Die vorgestellten Beschaffungsstrategien weisen in Abhängigkeit der jeweiligen Szenarien unterschiedliche Auswirkungen in Bezug auf den Haushaltsmittelbedarf auf. Bei der Ermittlung der jährlichen Haushaltsmittel für die Strategien wurde zwischen den Investitionsmitteln (initiale (Beschaffungs-) Kosten für Fahrzeuge und LIS) und den Konsumtivmitteln (variable Kosten während des Betriebs eines Fahrzeuges) der Flotte unterschieden.

Für die Berechnungen wurde die Annahme zugrunde gelegt, dass für jedes EV ein Ladepunkt zur Verfügung zu stellen ist¹⁴. Es wurden darüber hinaus durchschnittliche Gesamtkosten (Ladepunkt, Hardware und Erd-/Installationsarbeiten) für die LIS angenommen. Wird ein ICV durch ein EV ersetzt, so fallen einmalig Kosten für die Beschaffung und Installation des Ladepunktes an. Bei der Beschaffung von Ladepunkten für BEV wurde dabei zwischen AC- und DC-Ladepunkten variiert, für PHEV wurde immer die Beschaffung eines AC-Ladepunktes unterstellt.

Strategien¹⁵

1. Recht: In allen Szenarien ist diese Strategie aufgrund des geringen Anteils an EV bzgl. der Haushaltsmittel in den ersten zehn Jahren mit einem sehr geringen Anstieg des Haushaltsmittelbedarfes verbunden. Langfristig können die Haushaltsmittelbedarfe jedoch ansteigen, da die Beschaffungskosten für ICV sowie die Konsumtivmittel im Vergleich zu elektrifizierten Fahrzeugen stark ansteigen. Die Strategie zählt aus diesem Grund im Vergleich zu den anderen Beschaffungsstrategien insgesamt zu den teuersten.

¹⁴ Darüber hinaus gibt es natürlich noch andere Konzepte zum Aufbau von LIS (Ladeparks, mehrere EV teilen sich einen Ladepunkt o. ä.) welche jedoch in den hier durchgeführten Berechnungen nicht berücksichtigt wurden.

¹⁵ Hinweis: Bei den Berechnungen wurden Kosten für die LIS inkludiert.

Zudem wird bis zum Jahr 2030 lediglich ein Elektrifizierungsgrad von ca. 23 % erzielt.

2. CO₂: Im Vergleich zu den anderen Beschaffungsstrategien liegt diese Strategie in allen Szenarien in Bezug auf die jährlichen Haushaltsmittel im Mittelfeld. Mit ca. 82 % bis zum Jahr 2030 wird mit dieser Strategie jedoch der zweithöchste Elektrifizierungsgrad erreicht.

3. PHEV: Die Strategie „PHEV“ liegt in allen Szenarien bezüglich der Haushaltsmittel im Mittelfeld. Langfristig würde diese Beschaffungsstrategie jedoch die höchsten Haushaltsmittelbedarfe aufweisen. Der hohe Anteil an PHEV an den Ersatzbeschaffungen und den damit einhergehenden hohen Beschaffungskosten im Vergleich zu ICV sowie den hohen Konsumtivmitteln (insb. Wartungskosten) im Vergleich zu BEV führen zu hohen Ausgaben. Der Elektrifizierungsgrad liegt mit ca. 72 % bis zum Jahr 2030 im Mittelfeld.

4. EV extrem: Die Strategie „EV“ weist aufgrund des sehr hohen Anteils an PHEV bis zum Jahr 2030 in allen Szenarien die höchsten Haushaltsmittel auf. Langfristig würden die Haushaltsmittel durch den verstärkten Einsatz von BEV leicht sinken, trotzdem zählt die Strategie im Vergleich zu den anderen Beschaffungsstrategien zu den teuersten. Mit Strategie „EV extrem“ wird eine vollständige Durchdringung der betrachteten Flotte mit EV (Elektrifizierungsgrad von 100 %) bis zum Jahr 2030 erzielt.

5. BEV: Diese Beschaffungsstrategie zählt in Bezug auf die jährlichen Haushaltsmittelbedarfe in allen Szenarien zu den günstigsten Beschaffungsstrategien. Die Ermittlung des jährlichen Haushaltsmittelbedarfs zeigt, dass die Strategie „BEV“ bis zum Jahr 2030 die günstigste Ausbaustrategie ist. Im Fall einer langfristigen Erhöhung der Ersatzbeschaffungsanteile könnten die jährlichen Haushaltsmittel auf einem niedrigen Niveau konstant bleiben. Gründe hierfür liegen in dem hohen Anteil von BEV an den Ersatzbeschaffungen und den damit einhergehenden geringen Beschaffungskosten im Vergleich zu PHEV sowie den geringen Konsumtivmitteln im Vergleich zu ICV und PHEV. Mit dieser Strategie kann ein Elektrifizierungsgrad von ca. 53 % bis zum Jahr 2030 erzielt werden.

Erhalt des Status Quo: Diese Strategie weist in allen Szenarien zu Beginn des Betrachtungszeitraumes die geringsten jährlichen Haushaltsmittelbedarfe auf. Im Zeitverlauf steigen die jährlichen Haushaltsmittelbedarfe jedoch stark an und die Vorteilhaftigkeit dieser Strategie ist maßgeblich abhängig vom zugrundeliegenden Szenario. Im Szenario „Pro Elektromobilität“ würde der Erhalt des Status Quo zu den teuersten Strategien gehören. Im Szenario „Contra Elektromobilität“ würde diese Strategie auch langfristig die günstigste in Bezug auf die Haushaltsmittel sein. Definitionsgemäß bleibt der Elektrifizierungsgrad bis zum Jahr 2030 konstant bei nur knapp 6 %.

Die nachfolgende Abbildung 17 zeigt den durchschnittlichen jährlichen prozentualen Anstieg der Haushaltsmittel für die einzelnen Strategien und Szenarien im Überblick.

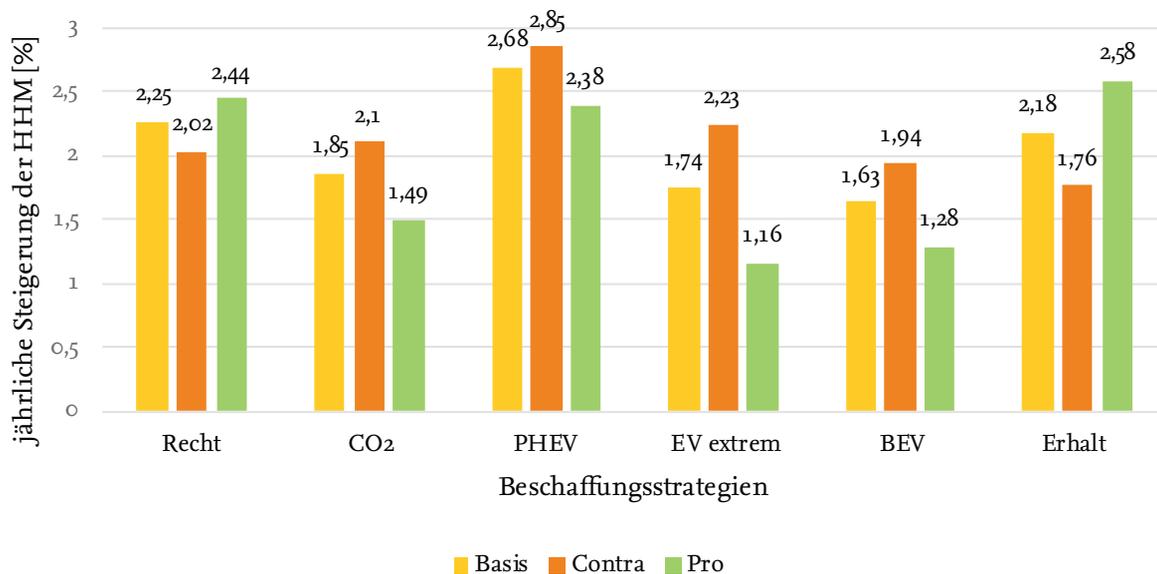


Abbildung 17: Durchschnittliche jährliche Steigerung der Haushaltsmittel [%] im Vergleich anhand der Beschaffungsstrategien und Szenarien.

Unabhängig von den Szenarien, den Ausbaustrategien für die Fahrzeugersatzbeschaffungen sowie den Betrieb des betrachteten Fuhrparks steigen die jährlichen Haushaltsmittelbedarfe an. Dies ist auch bei einem Erhalt des Status Quo der Fall. Die durchschnittliche jährliche prozentuale Steigerung der Haushaltsmittel für alle drei Szenarien beträgt für die günstigste Strategie 1,61 % (Strategie „BEV“) und für die teuerste sogar 2,64 % (Strategie „PHEV“).

Hinweis: Es kann eine durchschnittliche Gesamtkostensteigerung für die unterschiedlichen Beschaffungsstrategien von 2,03 % verzeichnet werden.

Hinsichtlich der drei Szenarien ist das Szenario „Pro Elektromobilität“ am günstigsten (1,89 % Steigerung der durchschnittlichen jährlichen Haushaltsmittelbedarfe), gefolgt von dem Basis-Szenario (2,05 % Steigerung der durchschnittlichen jährlichen Haushaltsmittelbedarfe) und dem Szenario „Contra Elektromobilität“ (2,15 % Steigerung der durchschnittlichen jährlichen Haushaltsmittelbedarfe).

Fazit: Die unterschiedlichen Beschaffungsstrategien von Fahrzeugen und der (zugehörigen) LIS erhöhen den jährlichen Bedarf in Bezug auf die Haushaltsmittel. Unter Einbezug der jährlichen Investitions- und Konsumtivmittel sowie des Elektrifizierungsgrades der betrachteten Flotte ist die Strategie „BEV“ vorteilhaft gegenüber allen anderen Strategien.

Je nachdem, wie sich das Marktangebot langfristig verändert und die Technologieentwicklung von Fahrzeugen und LIS zukünftig voranschreitet, bedarf es einer erneuten Bewertung von Beschaffungsstrategien. Technische Potenziale der Fahrzeuge, beispielsweise bezüglich des Elektrifizierungsgrades, einer höheren Reichweite oder einer verbesserten Robustheit der Fahrzeuge können Entscheidungen eines strategischen Flottenplaners in Zukunft stark beeinflussen. Auch innovative Formen von Energiespeichern oder ein zunehmender bundesweiter Ausbau des Ladenetzes können zu anderen Bewertungen unterschiedlicher Beschaffungsstrategien führen.

Hinweis: Es wird empfohlen sich kontinuierlich über neue Angebote und Rahmenbedingungen am Markt zu informieren, da technologische Entwicklungen und technische Potenziale teilweise erheblich auf die Bewertung unterschiedlicher Beschaffungsstrategien auswirken können.

6.3.3 Ökologische Auswirkungen

Die Umsetzung der beschriebenen Beschaffungsstrategien geht mit dem Ausstoß von Treibhausgasemissionen einher, die sich je nach Strategie und Szenario unterscheiden. Die Szenarien stellen mögliche zukünftige Entwicklungen dar, wobei das Szenario „Pro Elektromobilität“ niedrigere klimawirksame Emissionen für EV verursacht, während das Szenario „Contra Elektromobilität“ höhere klimawirksame Emissionen für diese Fahrzeuge zur Folge hat. Das Szenario „Basis“ befindet sich zwischen diesen beiden Ausprägungsformen.

Neben den Treibhausgasemissionen gibt es noch weitere Umweltwirkungen. Da hier jedoch die Datenlage deutlich schlechter ist, und die Modelle zur Charakterisierung dieser Umweltwirkungen weniger belastbar sind als die für die klimawirksamen Emissionen, werden an dieser Stelle nur letztere betrachtet. Es ist jedoch unvermeidlich, dass Zielkonflikte zwischen Treibhausgasemissionen und anderen Umweltwirkungen auftreten (z. B. Wassernutzung, Landnutzung, Ressourcenverbrauch), die aus der nachfolgenden Darstellung nicht offensichtlich werden. Eine vollständige Ökobilanz unter Einbeziehung verschiedener Umweltwirkungen kann die Identifizierung solcher Zielkonflikte, unter den genannten Einschränkungen, ermöglichen.

Abbildung 18 zeigt, welche klimawirksamen Emissionen über den gesamten Flottenlebenszyklus für die verschiedenen Strategien und Szenarien zwischen den Jahren 2020 bis 2030 (eingeschlossen) insgesamt voraussichtlich entstehen werden. Die Einheit sind 1.000 Tonnen CO₂-Äquivalente, d. h. alle klimawirksamen Gase sind entsprechend ihres Potenzials in die vergleichbare Menge an Kohlendioxid umgerechnet worden. Enthalten sind die Rohmaterialgewinnung, Produktion, Nutzung und Entsorgung der Fahrzeuge und der von ihnen genutzten Energieträger. Nicht enthalten ist die Wartung und Reparatur der Fahrzeuge sowie die Lebenszyklen der Infrastruktur (Straßen, Tankstellen, Ladesäulen).

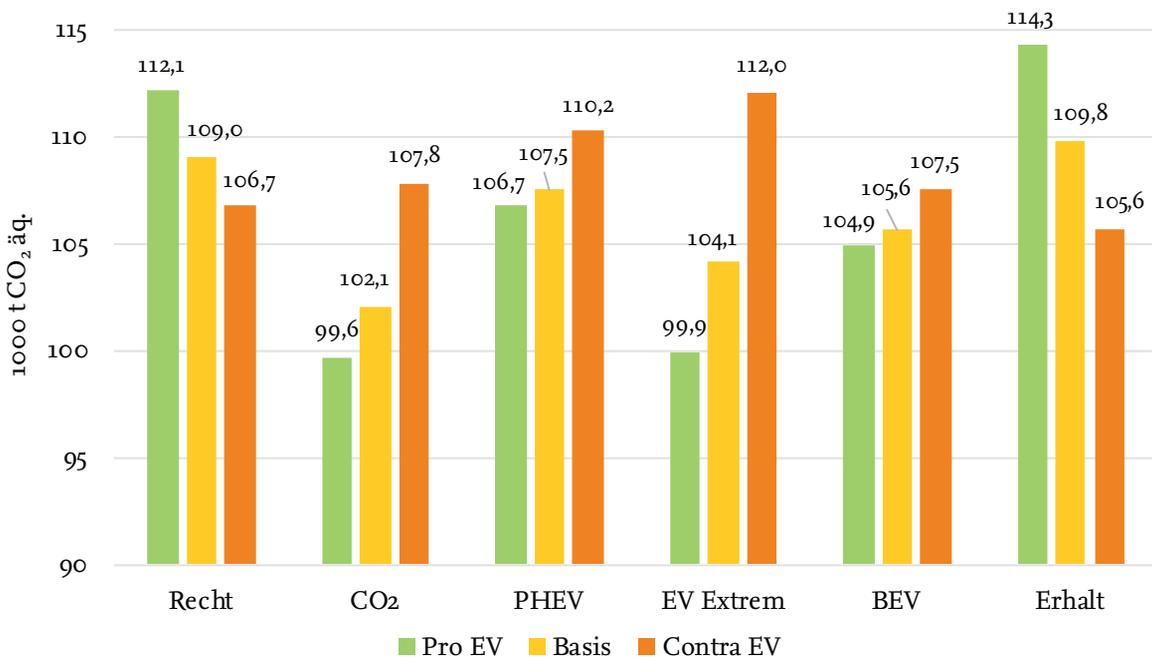


Abbildung 18: Kumulierte klimawirksame Emissionen für die Jahre 2020 bis 2030, für verschiedene Beschaffungsstrategien und Szenarien, unter Einbeziehung des gesamten Fahrzeuglebenszyklus, für die Flotte der niedersächsischen Polizei (2.355 Fahrzeuge).

Die Strategie „CO₂“ verursacht für das Szenario „Pro Elektromobilität“ und das Basisszenario die geringsten Emissionen. Lediglich für das Szenario „Contra Elektromobilität“ weisen die Strategien „Erhalt“, „Recht“ und „BEV“ geringere Emissionen auf. Insbesondere die Strategie „EV extrem“ ist vergleichsweise sensitiv bezüglich des Szenarios, d. h. bezüglich der äußeren Randbedingungen. Im Vergleich dazu weist das Szenario „BEV“ nur eine geringe Sensitivität auf. Dies rührt daher, dass die Strategie „EV extrem“ am stärksten von allen auf der Beschaffung von EV basiert, und dementsprechend stark von günstigen (und ungünstigen) Randbedingungen bezüglich der ökologischen Auswirkungen dieser EV betroffen ist.

Für ein detaillierteres Verständnis der klimawirksamen Emissionen für die einzelnen Fahrzeugantriebsarten sind diese in Abbildung 19 dargestellt. Zu sehen sind darin die Emissionen über den gesamten Lebenszyklus der Fahrzeugtypen, umgerechnet in Gramm CO₂-Äquivalente pro Kilometer, für jedes der Jahre 2020 bis 2030. Die Veränderungen über die Zeit ergeben sich aus den szenario-basierten Annahmen. Ein Datenpunkt spiegelt die Emissionen durch Produktion, Nutzung und Entsorgung eines Fahrzeugtyps in dem jeweiligen Jahr wider.

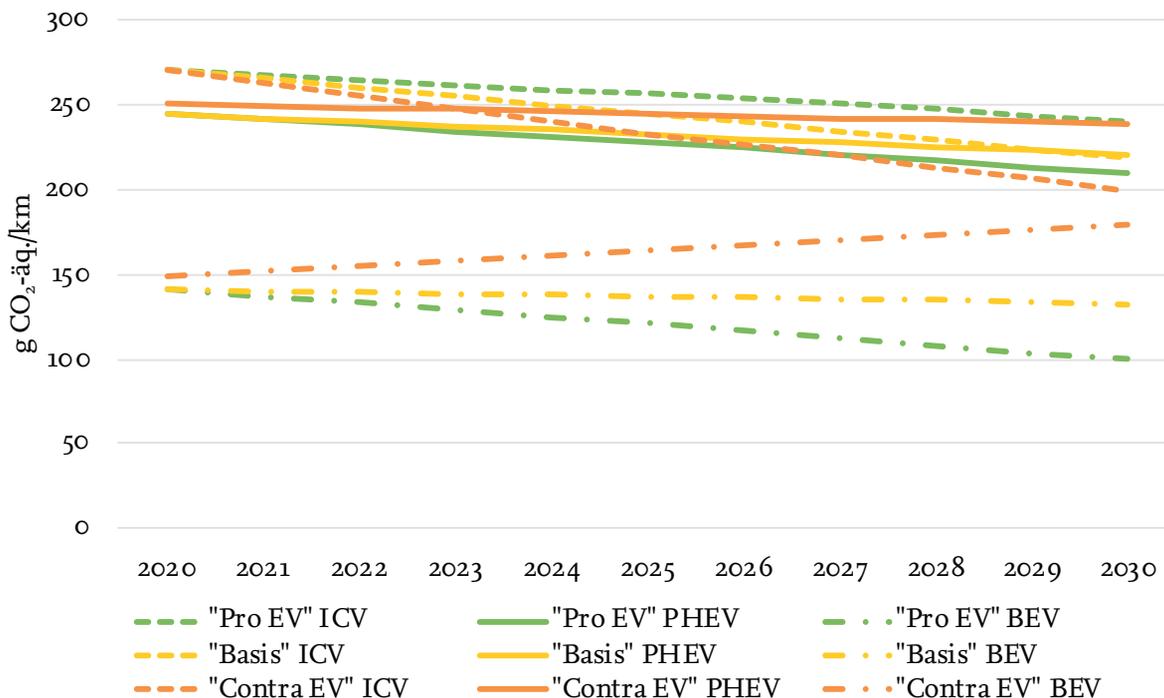


Abbildung 19: Klimawirksame Lebenszyklusemissionen für verschiedene Fahrzeugantriebe und Szenarien in den Jahren 2020 bis 2030, in Gramm CO₂-Äquivalente pro Kilometer. „Pro EV“ ICV beschreibt die Emissionen eines ICV im Szenario „Pro EV“.

Über den gesamten betrachteten Zeitraum und für alle Szenarien weisen BEV die niedrigsten Emissionen auf. PHEV liegen im Jahr 2020 nur knapp unterhalb von ICV, im weiteren zeitlichen Verlauf ist keine klare Unterscheidung mehr zwischen den Emissionen von ICV und PHEV mehr möglich.

Aus Abbildung 18 und Abbildung 19 lässt sich aus ökologischer Sicht die klare Empfehlung ableiten, so viele Fahrzeuge wie möglich durch BEV zu ersetzen. Dies gilt für den Betrachtungszeitraum bis 2030 sowie die erhobenen Daten und getroffenen Annahmen für den Anwendungsfall der Polizei Niedersachsen. Ursache dafür ist vor allem der hohe Gesamtwirkungsgrad von BEV (von der Quelle bis zum Rad). Im weiteren Zeitverlauf wird eine Überprüfung dieser Daten und Annahmen sowie ein Abgleich mit den beschriebenen Szenarien empfohlen, um die weitere Beschaffungsstrategie anzupassen. Dies spricht aus ökologischer Sicht für die Strategien „CO₂“ und „EV extrem“, mit einer etwaigen Anpassung, sollten sich die Randbedingungen gemäß dem Szenario „Contra EV“ entwickeln. Schließlich wird auch noch eine vollständige Ökobilanz unter Einbeziehung anderer Umweltwirkungskategorien empfohlen.

Fazit: Mit der empfohlenen BEV-Strategie können mittelfristig relative Einsparungen erwirtschaftet und die jährliche Steigerung des Haushaltsmittelbedarfes reduziert werden. Sie untermauert das innovative Erscheinungsbild der jeweiligen Organisation bzw. Institution, erhöht die positive Außenwirkung, berücksichtigt die prognostizierte Entwicklung und sinkende Bedeutung von ICV. In Bezug auf klimawirksame Emissionen ist die CO₂-Strategie die effektivste, sofern sich die Randbedingungen nicht stark ungünstig für BEV entwickeln. In jedem Fall ist eine möglichst hohe Quote an BEV für den Zeithorizont bis 2030 aus Klimaperspektive anzustreben.

6.4 Strategische Maßnahmen zur Umsetzung einer Ausbaustrategie

Die Umsetzung einer Ausbaustrategie bedarf einer sorgfältigen Planung und Vorbereitung durch die Entscheidungstragenden. Im Rahmen der Planung und Vorbereitung sollten bereits auf strategischer Ebene folgende Maßnahmen zum Auf- und Ausbau der LIS sowie technische und organisatorische Maßnahmen ergriffen werden.

Maßnahmen zum Auf- und Ausbau der LIS

Im Zuge der Beschaffung von EV muss die zugehörige LIS in den Planungen berücksichtigt werden. Dabei kann zwischen öffentlichen und privaten bzw. polizeieigenen Ladepunkten sowie zwischen AC- und DC-Ladestationen unterschieden werden. Die Nutzung von öffentlichen Ladepunkten allein ist für den behördlichen Einsatz nicht ausreichend, sollte aber als Ergänzung oder Option in Ausnahmesituationen genutzt werden. Der Aufbau einer polizeieigenen, landeseinheitlichen LIS wird empfohlen. Der Aufbau sollte zentral und behördenübergreifend koordiniert werden und sich an der jährlichen Ersatzbeschaffung von EV ausrichten. Unabdingbar ist, dass der Aufbau der LIS zeitlich so frühzeitig begonnen wird, dass bei Auslieferung der EV die LIS einsatzbereit ist.

Darüber hinaus ist an allen polizeilichen Standorten, an welchen Polizeifahrzeuge eingesetzt sind, eine Bestandsaufnahme im Hinblick auf die Möglichkeit der Installation weiterer Ladepunkte zwingend erforderlich. Dies ermöglicht eine Ermittlung der für den Ausbau der Elektromobilität erforderlichen Haushaltsmittel.

Bei einem Ausfall von Ladestationen muss sichergestellt sein, dass diese möglichst in kurzer Zeit wieder Instand gesetzt werden. Eine Möglichkeit, dies im Vorfeld sicherzustellen wären zum Beispiel entsprechende Serviceverträge mit Werkstätten oder Elektrofirmen abzuschließen (24/7-Service). Eine Rückfallebene oder Ausweichmöglichkeit sollte in jedem Fall eingeplant werden, um ad-hoc-Ausfälle kompensieren zu können.

Im Katastrophenfall sollte eine Notstromversorgung gewährleistet sein, um bei Bedarf die EV zu laden und somit die Einsatzfähigkeit in jedem Fall sicherzustellen. Dies könnte unter anderem über eigene oder durch andere Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) priorisiert bereitgestellte Generatoren, eigene PV-Anlagen oder Stromspeicher geschehen. Eine weitere Möglichkeit wäre es Verträge zu schließen, die ein priorisiertes Laden an öffentlichen Ladesäulen ermöglichen.

Außerdem sollten die Rahmenbedingungen geschaffen werden, um auch bei besonderen Lagen standortunabhängig das Laden von EV zu ermöglichen, um den erhöhten Ladebedarf an diesen Brennpunkten zu decken. Hier wäre unter anderem die Beschaffung mobiler Ladestationen eine Möglichkeit. Dazu sollte ein Einsatzkonzept erstellt werden, um den Bedarf an mobiler LIS zu definieren. Ggf. sind diese in ein Notfallkonzept der entsprechenden Behörde einzubetten.

Für den Aufbau und Betrieb sollten zentral und landeseinheitlich folgende Punkte entschieden werden:

- Frühzeitige Planung eines zentralen und behördenübergreifenden Aufbaus von landeseinheitlicher LIS.
- Schaffung eines Überblicks über den aktuellen Ausbau und die Planung von (weiteren) Ladesäulen.
- Festlegung von Standards der zu beschaffenden Ladestationen.
- Einführung eines Lade- und Lastmanagements.
- Sicherstellung eines 24-Stunden-Services für die Wartung und Reparaturmaßnahmen von Fahrzeugen und LIS, z. B. durch frühzeitiges Abschließen von Verträgen und Kooperationen mit Werkstätten und Servicepartnern.
- Gewährleistung einer Notstromversorgung der Ladestationen.

- Veranlassung der Einführung eines einheitlichen Abrechnungssystems.
- Einführung neuer Techniken zur eigenen Energieherstellung und -speicherung.
- Aufbau von mobilen Schnellladestationen für Großeinsätze (sog. BAO-Lagen), Katastrophenlagen o. ä.
- Vorsehen von Ausweichmöglichkeiten, z. B. Rückgriff auf geeignete Poolfahrzeuge, angemessene Reserven oder Ersatz vorhalten, Nutzungskonzepte öffentlicher LIS.

Organisatorische Maßnahmen

- Kontinuierliche Beobachtung des Marktes und Prüfung der Einführung geeigneter BEV-Modelle.
- Entwicklung eines landesweit einheitlichen Umsetzungsplanes.
- Aufbau eines Kompetenzteams/einer zentralen Stelle (ggf. temporär) für die strategische Planung und Umsetzung sowie die Koordination und Standardisierung.
- Entwicklung/Aufbau eines Schulungskonzeptes für die Mitarbeitenden zur Sicherstellung der Einweisung in Hochvoltfahrzeuge und zur Gewährleistung eines sicheren Umgangs mit diesen (Einweisung in das Laden, die unterschiedlichen Fahrmodi sowie das Verhalten bei einem Verkehrsunfall).
- Qualifizierung des Werkstattpersonals in den polizei-/behördeneigenen Werkstätten; Anpassung des Arbeitsumfeldes u.a. durch Einrichtung eines Hochvolt-Arbeitsplatzes.

6.5 Fazit

Die Ergebnisse machen deutlich, dass die Elektrifizierung von behördlichen Fahrzeugflotten einen Strukturwandel mit entsprechend großen Chancen und Risiken darstellt. Die Flottenplanung erfolgt unter unsicheren und im Wesentlichen exogen vorgegebenen Rahmenbedingungen. Insbesondere die Auswahl und Beschaffung von Fahrzeugen sowie zugehöriger LIS machen die Flottenplanung zu einer komplexen Aufgabe. Strategische Entscheidungstragende aus Politik und Verwaltung sollten den Ausbau der Elektromobilität unterstützen und finanzielle Beihilfen leisten.

- Gesetzliche Rahmenbedingungen lassen ein alleiniges Festhalten an ICV nicht zu. Klimaschutzvorgaben werden schrittweise verschärft und zwingen Fahrzeughersteller die Elektrifizierung des Antriebsstranges voranzutreiben. Gesetzliche Vorgaben, die zu einer (Teil-) Elektrifizierung der Flotte zwingen, sind in naher Zukunft sehr wahrscheinlich und sollten aufgrund ihrer erheblichen Auswirkungen bedacht und zeitgerecht vorbereitet werden.
- Das Marktangebot und die Technologieentwicklung von Fahrzeugen und der LIS beeinflussen die Entscheidungen von Flottenplanern. In den kommenden Jahren wird sich das Produktportfolio der Automobilhersteller weiterhin tiefgehend verändern und die Technologieentwicklung voranschreiten. So wird auch der Flottenplaner einer behördlichen Flotte durch die Markteinführung von innovativen Antriebskonzepten und politischen Interventionen in seinem Entscheidungsraum beeinflusst.
- Alle Ausbaustrategien von Fahrzeugen und der (zugehörigen) LIS und auch der Erhalt des Status Quo erhöhen den jährlichen Haushaltsmittelbedarf (jährlich um durchschnittlich 2,03 % – unabhängig von der zugrundeliegenden Strategie). Daher wird eine Anhebung des jährlichen Haushaltsmittelbudgets zur Sicherstellung der (polizeilichen) Mobilität empfohlen.
- In Anbetracht der zuvor dargestellten allgemeinen Kostensteigerungen sowie der Auswirkungen verschiedener Ausbau- bzw. Elektrifizierungsstrategien stellt sich die Frage, ob sich aus dem Haushaltsrecht nicht bereits eine Handlungsverpflichtung zur Umstrukturierung der eigenen Fahrzeugflotte ableiten lässt.
- Die Strategie „BEV“ ist vorteilhaft gegenüber allen anderen Strategien. Mit dieser Strategie können mittelfristig relative Einsparungen erwirtschaftet und die jährliche Steigerung des Haushaltsmittelbedarfes reduziert werden.
- Ein Beschaffungsverhalten mit einem starken Fokus auf PHEV gilt es aufgrund der langfristigen negativen Kostenwirkungen zu vermeiden. Es kann im Übergang jedoch positive Effekte bei der Einführung von EV, insbesondere zur Erlangung einer hohen Nutzerakzeptanz und Handlungssicherheit im Umgang mit EV, haben.

- Der Erhalt des Status Quo ist weder ökonomisch noch ökologisch sinnvoll. Zusätzlich gilt es zu berücksichtigen, dass der Erhalt des Status Quo weder den gesetzlichen Mindestanforderungen gerecht wird, noch eine Marktverfügbarkeit von ICV bis 2030 garantiert werden kann.
- Unabhängig von den Randbedingungen weisen BEV von allen Antriebsarten bis zum Jahr 2030 im Anwendungsfall der Landespolizei Niedersachsen die geringsten klimawirksamen Emissionen über den gesamten Lebenszyklus auf.
- Der Aufbau einer eigenen standardisierten LIS wird dringend empfohlen. Er sollte darüber hinaus zentral, vorausschauend und behördenübergreifend koordiniert werden.
- Für Großeinsätze (z. B. sog. BAO-/Katastrophenlagen) sollten zusätzlich mobile Schnellladestationen zur Verfügung stehen.
- Eine Sensibilisierung der Mitarbeitenden für das Thema „Elektromobilität“ sowie regelmäßige Schulungen sollten stattfinden.

7 Beschaffung

Dieser Abschnitt reflektiert auf die Beschaffung von EV und der für den Betrieb notwendigen eigenen LIS im Rahmen einer Ausbaustrategie. Es soll Hilfestellung für Fuhrparkmanager bei der Beantwortung folgender entscheidender Beschaffungsfragen geben:

- Welche technischen Voraussetzungen müssen die EV erfüllen und wie können diese im Rahmen eines Beschaffungsverfahrens umgesetzt werden?
- Welche Herausforderungen bei der Beschaffung und Installation von LIS bestehen und wie können diese gelöst werden?

7.1 Fahrzeugbeschaffung

7.1.1 Technische Mindestanforderungen

Die exemplarisch betrachtete Flotte der Polizei Niedersachsen ist durch eine enorme Diversität gekennzeichnet. Je nach Mobilitätsanforderung sind Anzahl, Fahrzeugsegment, Ausstattungsstandards und -optionen festgelegt. Der Einsatz von EV muss sich, wie auch ICV, an diesen Rahmenbedingungen orientieren.

Neben einem relativ geringen Anteil an Serienfahrzeugen, die keine speziellen hoheitlichen Aufgaben wahrnehmen (KFZ-N-, KFZ-L-, BHLKW) verfügt die Mehrheit der Fahrzeuge über polizeiliche Sonderausstattung. Die einsatztaktischen Anforderungen orientieren sich an den Erfordernissen zur Bewältigung polizeilicher Lagen und münden in festgelegte und jährlich angepasste Fahrzeugstandards. Diese dienen als Grundlage für die Ersatzbeschaffung polizeilicher Fahrzeuge. Hierbei ist festzuhalten, dass Fahrzeuge fast aller Fahrzeugkategorien gekauft werden. Lediglich zwei zivile Fahrzeugkategorien werden derzeit geleast. Der Anteil dieser Fahrzeuge an der Flotte beträgt ca. 3 %.

Fast die Hälfte der polizeilichen Flotte wird durch die Fahrzeugkategorie der FUSTW, FUSTW-N-, FUSTW-A- im Pkw-Segment gestellt. Gemeinsam mit den GFUSTW, GFUSTW-N- und den BABFUSTW zählen sie zu den Fahrzeugen des täglichen Dienstes

und stellen zusammen 64 % der polizeilichen Fahrzeugflotte mit 71 % der Flottengesamtlaufleistung¹⁶. Hier sollte somit der Schwerpunkt der Anstrengungen liegen, um den Anteil von EV in der Gesamtflotte signifikant zu erhöhen und Fahrzeugemissionen entscheidend zu reduzieren. Der vorliegende Leitfaden fokussiert ebenfalls auf die Fahrzeuge des täglichen Dienstes.

Gleichwohl stellen die zu erfüllenden Standards eines FUSTW bereits auch bisher eingesetzte ICV vor große Herausforderungen. Durch immer neue und sich verändernde mitzuführende Führungs- und Einsatzmittel (FEM), hat sich zum Beispiel die Zuladung sowohl im Volumen als auch im Gewicht deutlich erhöht. Bereits heute kommen die hier eingesetzten Fahrzeuge der Mittelklasse an die Grenze ihrer Zuladungskapazität, dies gilt für ICV sowie PHEV gleichermaßen. Hingegen erfüllen bei BEV derzeit nur sehr wenige diese Anforderungen und wenn, dann sind dies häufig teure Fahrzeugmodelle.

Mindestreichweiten sind derzeit bei der Polizei Niedersachsen noch nicht gefordert, spielen allerdings für die Integration von BEV eine entscheidende Rolle, da das Wiederherstellen der Mobilität durch das Laden noch deutlich länger dauert als ein normaler Tankvorgang. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes lautlos&einsatzbereit zeigen, dass die erforderliche Reichweite sowie Ladeleistung stark vom Einsatzgebiet der Fahrzeuge abhängen. Eine Übersicht bietet die nachfolgende Abbildung 20.

	Einsatz- und Streifendienst	Ermittlungsdienst Stab & Fiskal
 Mindest-Reichweite¹	urban: 250 km rural: 350 – 400 km extra rural: über 500 km	350 – 400 km
 Ladeleistung	Fahrzeug AC: 11 kW DC: über 50 kW <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> Infrastruktur AC: 11 kW DC: über 50 kW (extra rural)	Fahrzeug AC: 11 kW DC: über 50 kW <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> Infrastruktur AC: 11 kW DC: -

Abbildung 20: Übersicht der empfohlenen Mindeststandards

¹⁶ Vgl. LAG (2020).

Im Anwendungsfall ESD urban ist bereits eine Reichweite von 250 km nach WLTP und eine Ladeleistung von 7,2 kW ausreichend, um den Mobilitätsbedarf vollständig zu decken. Demgegenüber sind in den Szenarien ESD rural und ESD extra rural insbesondere höhere Reichweiten erforderlich. Diese sollte mindestens 350–400 km bzw. über 500 km nach WLTP betragen. Die Ladeleistung hat einen geringeren Einfluss auf die Erfüllung des Mobilitätsbedarfs, sodass 11 kW grundsätzlich ausreichend sind. Durch Schnellladung lässt sich die Verfügbarkeit nur in geringem Maße steigern. Die größten positiven Effekte werden dabei in den Einsatzgebieten mit kurzen Standzeiten erzielt.

Hinweis: Eine größere Reichweite ist der Schnellladung i.d.R. vorzuziehen. Für eine vollständige Erfüllung des Mobilitätsbedarfes¹⁷ in den Szenarien ESD rural und ESD extra rural, steigt der notwendige Aufwand erheblich an und erfordert mitunter Reichweiten von mehr als 500 km nach WLTP sowie eine Möglichkeit zur Schnellladung mit mehr als 50 kW. Für die Anwendungsfälle KED sowie Stab & Fiskal sind Reichweiten von 350–400 km nach WLTP sowie eine Mindestladeleistung von 7,2 bis 11 kW ebenfalls ausreichend.

Großeinsätze haben in der jüngeren Vergangenheit gezeigt, dass viele der Einsatzfahrzeuge von BOS nahezu ohne Unterbrechung im Einsatz waren. Um auch hier die Mobilität uneingeschränkt zu gewährleisten, bedarf es des kontinuierlichen Aufbaus eines Ladeinfrastrukturnetzes sowie des Bereithaltens von Hotspot-Schnellladesäulen, welche flexibel einsetzbar sind. Darüber hinaus sind überregionale und ggf. länderübergreifende Kompatibilitäten zu berücksichtigen.

Die meist geringere Höchstgeschwindigkeit von BEV gegenüber ICV stellt kein Ausschlusskriterium für die Nutzung als FUSTW im ESD dar. Abbildung 21 zeigt die aufgetretenen Fahrgeschwindigkeiten der Projektfahrzeuge im ESD (ICV und PHEV). Demnach erfüllt eine Höchstgeschwindigkeit von 150–160 km/h über 99 % des Bedarfs und ist als ausreichend anzusehen. Eine Ausnahme stellt der Anwendungsfall ESD BAB dar, in welchem der Anteil von Geschwindigkeiten über 150 km/h ca. 20 % beträgt.

¹⁷ Eine vollständige Erfüllung des Mobilitätsbedarfes bedeutet, dass alle statistisch auftretenden Fahraufträge in einem Jahr bedient werden können und keine Alternativfahrzeuge zulässig sind.

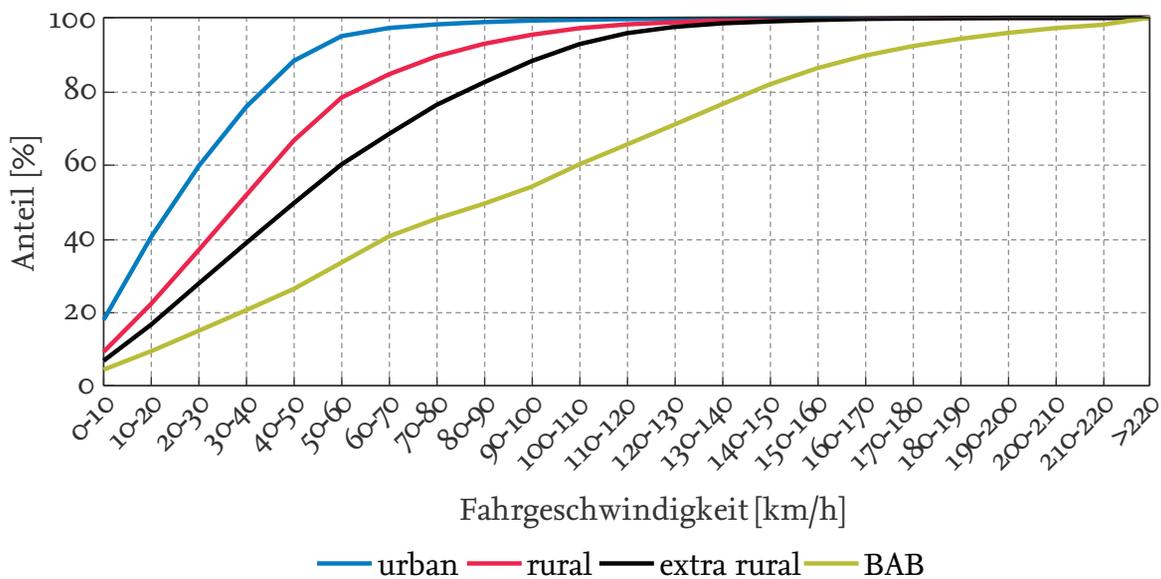


Abbildung 21: Fahrgeschwindigkeiten von ICV und PHEV im ESD

Für die Fahrzeugkategorie GFUSTW gibt es derzeit noch keine geeigneten Modelle, welche alle Anforderungen erfüllen. Dies resultiert insbesondere aus den unterschiedlichen Mobilitätsanforderungen bei geschlossenen Einsätze sowie der parallel zu erfüllenden Anforderungen im ESD (insbesondere bei Fahrzeugen der Einzeldienst-hundertschaften).

BABFUSTW wiederum sind durch ihr besonderes Fahrprofil gekennzeichnet, welches durch hohe Tageskilometerlaufleistungen und hohe Geschwindigkeiten geprägt ist. Derzeit erfüllen nur BEV aus dem Fahrzeugsegment der Oberklasse oder hochpreisi-ge SUV diese Anforderungen. Da auch PHEV mit derzeit durchschnittlich ca. 50 km Reichweite nur bedingt auf den Autobahnen elektrisch unterwegs wären, ist aus hiesiger Sicht weiterhin der Einsatz von Fahrzeugen mit Dieselmotor unumgänglich. Mittelfris-tig wird hier der Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen empfohlen, sofern diese die extremen Anforderungen an Verfügbarkeit und Höchstgeschwindigkeit erfüllen.

Im Ergebnis bestehen die größten Herausforderungen in der Marktverfügbarkeit ge-eigneter BEV sowie dem Ausbau der Fahrzeuge mit polizeilichen Sonderkomponenten. Insbesondere für den Fall, dass die Fahrzeughersteller keine eigene Ausbausparte be-treiben und damit ein sogenanntes „Einrechnungsgeschäft“ ermöglichen, sind logisti-sche Mehraufwände sowie längere Beschaffungszeiträume festzustellen.

Fazit: Die Erfahrungen im Forschungsprojekt zeigen, dass durch die derzeit enormen Veränderungen in der Automobilbranche die Unsicherheiten in der verlässlichen Fahrzeugbeschaffung gestiegen sind. Angekündigte Einführungen neuer Modelle verzögerten sich, sodass platzierte Ausschreibungen nicht bedient werden konnten. Firmenübernahmen und Zusammenschlüsse, die noch vor Jahren nur äußerst selten vorkamen, häufen sich und bringen weitreichende Veränderungen mit sich. Neue Anbieter erobern den Markt und können genauso schnell wieder verschwinden. Hierdurch wurden die Beschaffungsprozesse im Forschungsprojekt teilweise stark verzögert oder sind gescheitert, insbesondere in jenen Fällen, in denen das avisierte Fahrzeugsegment nur von sehr wenigen oder einzelnen Fahrzeugherstellern bedient werden konnte. Mit fortschreitender Einführung neuer EV durch die großen bisher den Markt beherrschenden Automobilhersteller und der damit einhergehenden Neusortierung des Marktes werden sich diese Unsicherheiten auflösen. Fraglich bleibt hingegen, ob diese neuen Modelle, welche ausschließlich auf E-Mobilitätsplattformen basieren, auch die spezifischen Anforderungen und notwendigen Umbauten zu BOS-Fahrzeugen bewältigen können. Mögliche Karosserieformen und Designvarianten des Innenraumes stellen den Einbau von Sondertechnik schon heute vor enorme Herausforderungen.

7.1.2 Ausschreibungs- und Vergabeangelegenheiten

Alle Fahrzeuge im Forschungsprojekt wurden unter Beachtung der derzeit gültigen Vergabevorschriften beschafft. Je nach Schwellenwert wurden die Fahrzeuge teils europaweit ausgeschrieben. Elementarer Bestandteil der Ausschreibung ist das Leistungsverzeichnis (LV), welches die Auswahlkriterien enthält. Hier fließen die technischen Anforderungen an das Fahrzeug ein (vgl. Abschnitt 7.1.1). Im Gegensatz zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren kommen neue oder andere technische Anforderungen hinzu. So kann beispielsweise die Anforderung an die Reichweite über die Batteriekapazität abgebildet werden. Folgende Kriterien sollten daher bei der Erstellung des LV für EV unbedingt bedacht werden:

- BEV oder PHEV
- Front-, Heck- oder Allradantrieb
- Motorleistung in kW
- Typ der Ladedose am Fahrzeug (Schnellladefähigkeit erforderlich?)
- Batteriekapazität in kWh oder Reichweite nach WLTP
- Art des Ladekabels
- Zusätzliche Ausstattung wie z. B. eine Wärmepumpe

Gemäß der Aufzählung sollte zuerst bestimmt werden, ob ein PHEV oder ein BEV den Anforderungen am besten genügt. Hier können technische, taktische oder ökologische Anforderungen die Wahl beeinflussen. Bei der Motorleistung und der Batteriekapazität wird eine Eingrenzung in beide Richtungen empfohlen. Neben einer Minimalforderung sollte auch ein Maximalwert definiert werden. Dieser dient vor allem der Minimierung finanzieller Risiken, da die Batteriegröße entscheidenden Anteil an den Gesamtkosten eines EV hat. Zum anderen sollte diese aus ökologischen Gründen nicht größer als unbedingt erforderlich gewählt werden. Detaillierte Kenntnisse über den Anwendungsfall sind daher unabdingbar. Die Ladefähigkeit des Fahrzeuges sollte zum einen auf die aufgebaute LIS adaptiert werden und zum anderen den taktischen Anforderungen hinsichtlich der Ladeleistung genügen. Für das AC-Laden im öffentlichen Raum wird die Beschaffung eines zusätzlichen Ladekabels empfohlen.

Ist für ein Fahrzeugmodell eine Wärmepumpe für die Beheizung des Innenraums verfügbar, sollte eine Beschaffung geprüft werden, um den Einfluss niedriger Außentemperaturen auf die Reichweiten zu verringern. Ein Vergleich der im Forschungsprojekt erhobenen Fahrdaten des gleichen Fahrzeugmodells mit und ohne Wärmepumpe zeigte, dass die Reichweite zwischen 0 und 10°C bei Fahrzeugen mit Wärmepumpe um bis zu 13 % höher war.

Nach Auswahl der technischen Kriterien stellt sich die Frage nach der Art der Beschaffung. Kauf oder Leasing sind hier die am häufigsten anzutreffenden Beschaffungsmodelle. Bisher wurden für EV kaum wirtschaftliche Leasingkonditionen angeboten, möglicherweise um unbekanntes Risiko hinsichtlich der Batteriealterung zu kompensieren. Erst mit dem Jahr 2020 sind deutliche Preisrückgänge im Leasing am Markt

zu verzeichnen. Die Entscheidungskriterien sind letztlich gegenüber Verbrennungsfahrzeugen identisch. Zu beachten ist, dass viele der aktuellen Fördermöglichkeiten in Deutschland nur auf den Kauf von EV abzielen.

Weiterhin sollte bei jeder Beschaffung abgewogen werden, ob eine Einzelbeschaffung oder der Abschluss eines mehrjährigen Rahmenvertrags vorteilhafter ist. Insbesondere bei jährlich wiederkehrender Ersatzbeschaffung in bekannten Anwendungsfällen mit identischen technischen Anforderungen sind Rahmenverträge eine Alternative. Je komplexer der Einbau der spezifischen Sondertechnik in das Basisfahrzeug ist, desto eher wird der Abschluss von Rahmenverträgen empfohlen. Zum einen können so finanzielle Mehraufwendungen für die Entwicklung kompensiert werden. Zum anderen wird die Lieferbarkeit von Modellen abgesichert.

7.2 Beschaffung von Ladeinfrastruktur

7.2.1 Technische Mindestanforderungen

Die meisten Fahrzeugmodelle können Wechselstrom (AC) mit 3,7 bis 11 kW laden. Nach heutigen Prognosen wird die Ladeleistung mit Wechselstrom auch bei zukünftigen Modellen nicht über 11 kW hinausgehen. Daher werden AC-Ladestationen mit einer Ladeleistung von 11 kW je AC-Ladepunkt empfohlen (vgl. Abbildung 20). Dies gewährleistet die Zukunftssicherheit der Ladepunkte. In Anwendungsfällen, in denen die Fahrzeuge überwiegend zu Tagesdienstzeiten eingesetzt werden, genügt häufig ein 11 kW AC-Ladepunkt, da über Nacht ausreichend Zeit zum Laden vorhanden ist. Hier kann sich an der Abbildung 33 aus den Grundlagen zur LIS orientiert werden. Sind die Anwendungsfälle durch kurze Standzeiten und hohe Kilometerlaufleistungen geprägt, sollte zusätzlich über den Aufbau von Schnellladestationen mit mindestens 50 kW Ladeleistung nachgedacht werden. Diese sind zwar sowohl in der Beschaffung als auch bei der Installation um ein Vielfaches teurer, können jedoch den Schnellladebedarf mehrerer Fahrzeuge am Tag decken.

Nach den Leistungsspitzen (höchster erreichter Leistungswert im Jahr oder Monat) richtet sich der Leistungspreis, welcher so etwas wie eine Grundgebühr auf den Strompreis

darstellt. Mit höherer Leistungsspitze fallen höhere Kosten durch den Stromanbieter an. Aus diesem Grund empfiehlt es sich durch ein Managementsystem diese Spitzenlast so gering wie möglich zu halten. Dies kann auch durch die Errichtung eines eigenen Netzanschlusses ausschließlich für LIS gelingen.

Grundsätzlich ist der Betrieb der Ladestationen als reine Stromquelle möglich. Beim Betrieb mehrerer Ladepunkte an der gleichen Unterverteilung sind die Leistungsreserven beim parallelen Betrieb aller Ladepunkte schnell erreicht. Hier kann die zusätzliche Verwendung eines Lastmanagements und/oder Lademanagements erforderlich sein. Beim Lastmanagement sollten zu große Lastspitzen durch Abschaltung bzw. Regulierung einzelner oder mehrerer Ladepunkte vermieden werden. Beim Lademanagement können die Ladepunkte zusätzlich individuell gesteuert und priorisiert werden. Voraussetzung hierfür ist die Kommunikationsfähigkeit der Ladestationen. Das Kommunikationsprotokoll OCPP 1.6 oder die Kommunikationsfähigkeit über MODBUS sind als Standard bereits etabliert.

Sobald die Summe der maximalen Ladeleistung, der am Standort ladenden Fahrzeuge größer ist als die Netzanschlussleistung, die an dem Standort für die EV zur Verfügung steht, wird die Integration eines Lademanagements empfohlen. Dies ist häufig günstiger als die Ertüchtigung des Netzanschlusses. Lademanagementsysteme können direkt über die Hersteller der Wallboxen bezogen werden. Zudem existieren unabhängige Anbieter, die herstellerunabhängig ein Lademanagement anbieten. Lademanagementoptionen stellen z. B. die Lademanagementmethoden „First Come First Serve“ oder „Equal“ dar. Hier wird die zur Verfügung stehende Leistung nach festgelegten Regeln auf die zu ladenden Fahrzeuge verteilt. Dabei besteht die Option bestimmte Fahrzeuge einer Kategorie (z. B. ESD) von dieser Steuerung auszunehmen und dadurch höher zu priorisieren. Eine andere Option ist, Fahrzeuge eines anderen Typen (z. B. KED) immer mit der minimalen Ladeleistung zu laden, um die Fahrzeugbatterie zu schonen. Weitere Möglichkeiten stellen Lastmanagementlösungen dar, welche die verfügbare Leistung der entnommenen Last am Standort anpassen. Ein ähnliches Vorgehen kommt bei der Erzeugung von Solarstrom über eine Photovoltaikanlage zum Tragen. Hier kann ebenfalls über ein Lademanagement primär der erzeugte Strom in die ladenden Fahr-

zeuge eingespeist werden. Eine Photovoltaikanlage in Verbindung mit EV ist grundsätzlich zu empfehlen und kann sowohl Netzanschluss- als auch Energiekosten einsparen.

Grundsätzlich hat sich die Beschaffung von Wallboxen mit angeschlagenem festem Kabel bewährt. Es erleichtert das Handling, reduziert den Zeitaufwand beim Laden und minimiert das Risiko von Beschädigungen am Kabel.

Hinweis: Spiralkabel erhöhen den Komfort nochmals, da zeitaufwändiges Aufrollen entfällt. Hinsichtlich der Kabellängen werden für Einsatzfahrzeuge im 24/7 Dienst mindestens 5 m empfohlen.

Sollte die Möglichkeit der Wandmontage nicht gegeben sein, beispielsweise, weil die Fassade denkmalgeschützt ist, muss die Wallbox auf einer Ständer- bzw. Säulenvorrichtung installiert werden. Dies sollte bereits bei der Beschaffung berücksichtigt werden. Fast alle Wallboxhersteller bieten Säulen gegen Aufpreis an.

Eine Autorisierungsfunktion ist notwendig, wenn es intern Anforderungen gibt, die Energiemenge bestimmter EV zu erfassen. Eine Autorisierungsoption ist in den meisten Ladevorrichtungen vorhanden und kann beliebig ein- oder ausgeschaltet werden. Einen weiteren Nutzen hat die Autorisierungsfunktion, wenn ein Lademanagement eingesetzt wird. Dieses kann durch die Kennung über die Autorisierung unterscheiden, ob es sich bei dem EV um ein Prioritätsfahrzeug handelt, welches immer die höchste Ladeleistung erhält.

7.2.2 Ausschreibungs- und Vergabeangelegenheiten

Die LIS im Forschungsprojekt wurde unter Beachtung der derzeit gültigen Vergabevorschriften beschafft. Hierzu wurden zwei europaweite Ausschreibungen platziert, welche in zwei zeitlich aufeinanderfolgende Rahmenverträge mündeten. Der Vorteil des Abschlusses von Rahmenverträgen liegt in der Beschaffungssicherheit über einen längeren Zeitraum. Im Forschungsprojekt wurden Rahmenverträge mit einer Laufzeit von zwei Jahren abgeschlossen. Zu lange Laufzeiten bergen wiederum das Risiko nicht auf neue Entwicklungen frühzeitig genug reagieren zu können.

Elementarer Bestandteil der Ausschreibung ist das LV, welches die Auswahlkriterien enthält. Hier fließen die technischen Anforderungen (vgl. Abschnitt 7.2.1) an die LIS ein. Folgende Kriterien sollten daher bei der Erstellung des LV unbedingt bedacht und je nach Anforderungsprofil als Ausschlusskriterium oder optional ausgeschrieben werden:

- Ladebetriebsart (DC oder AC)
- Typ des Ladesteckers
- Ladeleistung
- Kabellänge
- Integrierte Sicherheitssysteme (z. B. FI-Schalter, Leitungsschutzschalter)
- Zweiter Ladepunkt
- Energiezähler
- Kommunikationsfähigkeit
- Autorisierungsfunktion
- Lieferbarkeit einer Säule zur Befestigung
- Installationsarbeiten
- Dienstleistungen (Service, Wartung, Sicherheitsprüfungen)
- Backend für mögliche Abrechnungssysteme

Im Forschungsprojekt wurde der Aufbau der LIS in zwei getrennten Schritten vollzogen. Nach zentraler Ausschreibung und Beschaffung wurde die Installation im zweiten Schritt getätigt. Diese Verfahrensweise konnte im Projekt erfolgreich umgesetzt werden, eignet sich aber nur bedingt für größer dimensionierte Ladeinfrastrukturvorhaben. Hierfür wird die Beauftragung eines Dienstleisters empfohlen, welcher die Beschaffung und Installation aus einer Hand ausführen kann. So kann auf unterschiedliche örtliche Gegebenheiten mit individuellen Lösungen reagiert werden. Eine Ladelösung auf einer Polizeistation mit einem Fahrzeug, welches lediglich im Tagesdienst eingesetzt wird, kann trivialer ausgestaltet sein, als eine Polizeidirektion mit angebundenem ESD im 24/7 Schichtbetrieb. Hier werden deutlich mehr und intelligentere Ladelösungen erforderlich sein.

7.2.3 Aufbau/Installation der Ladeinfrastruktur

Die Installation zu beschaffender LIS stellt in Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten eine besondere technische und finanzielle Herausforderung dar. Diese örtlichen Gegebenheiten sollten daher im Planungsprozess unbedingt berücksichtigt werden.

Eine Rücksprache mit dem örtlichen Netzbetreiber sowie die Berücksichtigung der technischen Anschlussbedingungen ist unabdingbar. Hierbei muss sich über eventuell festgelegte Bedingungen zur Abregelung von Lasten informiert werden. Frühzeitige Analysen des ausgewählten Standortes sollten folgende Faktoren berücksichtigen und in einen Finanzierungsplan einfließen:

- Netzanschlussleistung
- Weglänge von der Haupt- oder Unterverteilung zum geplanten Ladepunkt
- Montagemöglichkeiten für die Ladestationen
- Denkmalschutzvorschriften
- Eigentumsverhältnisse
- Stellplatzsituation
- Notstromversorgung der Ladepunkte

Insbesondere umfangreiche Erdarbeiten und Ertüchtigungen der Netzanschlussleistungen können die Installationskosten deutlich steigen lassen. Kurze oberirdische Leitungswege mit wenigen Durchbrüchen halten die Installationskosten gering. Unzureichende Netzanschlussleistungen können alternativ in bestimmten Fällen mit einem Lademanagementsystem ausgeglichen werden. Die Wahl des Standortes nach rein finanzieller Gesichtspunkten allein kann allerdings ebenfalls zu erheblichen Nachteilen führen. Hier ist bei der Entscheidung des Standortes zwischen taktischen Anforderungen, den täglichen Gewohnheiten der Nutzenden (Nutzerakzeptanz) und der kalkulierten Kosten abzuwägen.

Grundsätzlich wird empfohlen für die Installation der LIS einen qualifizierten Elektroinstallateur zu beauftragen. Dieser sollte mit allen Anforderungen und Normen für den Anschluss vertraut sein. Viele Regionen bieten mittlerweile online Übersichten von geschulten Elektroinstallateuren an.

Die Kosten für die Installation einer Wallbox im Forschungsprojekt betragen durchschnittlich ca. 1.600 €. Allerdings sind Kostenschwankungen von ca. 500 € bis ca. 8.000 € je Ladepunkt zu verzeichnen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Ladepunkte vorwiegend einzeln an vielen Standorten installiert wurden. Umfangreiche Ertüchtigungen der Anschlussleistungen waren daher kaum nötig. Nach Projektende installierte LIS mit einer Konzentrierung mehrerer Ladepunkte an einem Standort führten zu höheren Installationskosten bis über ca. 10.000 je Ladepunkt. Bei der groben Abschätzung der Installationskosten können auch Checklisten helfen, welche allerdings meist auf eine private Nutzung ausgelegt sind. Für eine detaillierte Kostenanalyse ist die Einholung von Kostenvoranschlägen unabdingbar.

7.3 Fazit

Die Beschaffung von EV unterscheidet sich grundsätzlich kaum von der Beschaffung von ICV. Die größten Herausforderungen liegen in der Marktverfügbarkeit geeigneter Modelle sowie deren Ausbau mit spezifischer Sondertechnik. Mögliche Karosserieformen und Designvarianten des Innenraumes stellen den Einbau der Sondertechnik schon heute vor enorme Herausforderungen.

Die Beschaffung der LIS ist hingegen ein völlig neues Tätigkeitsfeld, welches für die Elektrifizierung des Fuhrparks nötig ist. Folgende Handlungsempfehlungen können gegeben werden:

- Die Installation eines AC-Ladepunktes sollte zu jedem EV am Heimatstandort erfolgen.
- Angeschlagene Ladekabel erleichtern das Handling.
- Eine Ladeleistung von 11 kW für AC-Laden ist zukunftssicher.
- Die Kommunikationsfähigkeit der LS sollte gegeben sein (OCPP 1.6 oder MODBUS über Ethernet).
- Ein Fehlerstromschutzschalter (FI) sollte bereits integriert sein.
- Übersteigt die Summe der maximalen Ladeleistung aller Fahrzeuge die zur Verfügung stehende Leistung des Netzanschlusses, kann ein Lademanagement eine sinnvolle Alternative zur Erhöhung der Netzanschlussleistung sein.

- An Brennpunkten sollten DC-Ladepunkte mit mindestens 50 kW zur Verfügung stehen.
- Eine Autorisierungsfunktion vereinfacht die Abrechnung und Zugangssicherheit.
- Der Abschluss von Rahmenverträgen erhöht die Einheitlichkeit und Zuverlässigkeit.

8 Betrieb

Der Betrieb von EV stellt Fuhrparkverantwortliche vor die Herausforderung, diese Fahrzeuge effektiv unter den gegebenen taktischen und strategischen Anforderungen des Alltags in den Fuhrpark zu integrieren. Der Betriebsplanung und -steuerung obliegt die Aufgabe, das „richtige“ Fahrzeug für einen bestimmten Einsatzzweck zum geforderten Zeitpunkt zur Verfügung zu stellen. Hierbei sind die örtlich gegebenen Faktoren wie z. B. geplante Einsatzdauer, geforderte Reichweite, Lademöglichkeiten im Rahmen von Standzeiten und notwendige Zuladung von eminenter Bedeutung.

Verantwortliche für die Betriebsplanung stehen jedoch vor Fragen und Herausforderungen, die bislang beim Betrieb eines konventionellen Fuhrparks bislang nicht berücksichtigt werden mussten. Ebenso stellt der Umgang mit einem PHEV bzw. BEV für viele Nutzende eine neue Erfahrung dar. Daher ist eine sorgfältige Einführung dieser Einsatzmittel in den täglichen Dienst für die Akzeptanz dieser von großer Wichtigkeit. Im Folgenden werden daher Aspekte der Fuhrparkplanung und -steuerung, der Nutzung von PHEV bzw. BEV im täglichen Betrieb sowie Fragen, die im Zusammenhang mit der Wartung und Instandsetzung dieser Fahrzeuge auftreten, beleuchtet.

8.1 Betriebsplanung und -steuerung eines elektrifizierten Fuhrparks

Im Fokus der Betriebsplanung und -steuerung steht die Frage, wie sich EV in den Betrieb eines konventionellen Fuhrparks integrieren lassen. Das Augenmerk liegt dabei auf dem Austausch von ICV (vorrangig Diesel) durch PHEV oder BEV. Dieser Austausch innerhalb des Fuhrparks sollte optimaler Weise für den Nutzenden keine Einschränkungen bzw. keine zusätzlichen Belastungen oder Aufwände mit sich bringen.

8.1.1 Auswirkungen des Betriebs elektrifizierter Fahrzeuge auf die Fuhrparkplanung und -steuerung

Sofern die LIS für zu integrierende EV vorhanden ist, hat deren Einsatz kaum Auswirkungen auf die Fuhrparkplanung. Lediglich hinsichtlich der zu planenden Haushaltsmittel

sollten die derzeitig noch erhöhten Beschaffungskosten auch für eine unplanmäßige Ersatzbeschaffung eingeplant werden.

Gekaufte Fahrzeuge sollen üblicherweise über sechs bis acht Jahre genutzt werden. Aufgrund der hohen Belastungen im ESD werden die dort eingesetzten Fahrzeuge daher nur eine begrenzte Zeit in diesem Anwendungsfall betrieben. Sie werden durch neue Fahrzeuge ersetzt oder mit an anderen Dienststellen genutzten Fahrzeugen getauscht. Für diese Fahrzeugrotation ist bei EV auch die Batterie zu berücksichtigen. Aufgrund von Alterungsprozessen nimmt die Leistungsfähigkeit sowie der Energieinhalt der Batterie (und folglich die Reichweite) ab. Fahrzeughersteller haben für die Traktionsbatterie unterschiedliche Garantiebedingungen hinsichtlich der Alterung. In der Regel gilt eine Batterie als defekt, wenn der maximale Energieinhalt auf 70–80 % (je nach Fahrzeughersteller) des Werts der neuen Batterie abgesunken ist. Dieser Parameter wird als Gesundheitszustand bzw. State of Health (SoH) bezeichnet. Anhand der Fahrzeugmessdaten wurde der SoH bei Projektende für die Fahrzeuge bestimmt und berechnet, wann der SoH auf 70 % absinken, die Batterie folglich als defekt gelten würde.

Für die eingesetzten PHEV im ESD ist festzustellen, dass die Batterien bei gleichbleibender Nutzung im Schnitt nach ca. fünf Jahren als defekt gelten würden. Je nach Anwendungsfall entspricht dies unterschiedlichen durchschnittlichen Laufleistungen:

- ESD urban: ca. 170.000 km,
- ESD rural: ca. 290.000 km,
- ESD extra rural: ca. 380.000 km.

Die prognostizierten Laufleistungen in den Szenarien rural und extra rural liegen dabei im Bereich der von Fahrzeugherstellern, auch für ICV, als Auslegungsgröße verwendeten Laufleistung von üblicherweise 250.000–300.000 km. Die individuelle Nutzung der Fahrzeuge hat dabei einen erheblichen Einfluss auf die Batteriealterung. So liegen die prognostizierten Lebensdauern der Fahrzeuge im Anwendungsfall ESD rural bei drei bis acht Jahren, das entspricht einer Laufleistung zwischen 180.000 und 390.000 km. Die Entwicklung der verfügbaren Batteriekapazität (entspricht dem SoH) aller im ESD eingesetzten PHEV über der Nutzungszeit zeigt Abbildung 22. Dabei repräsentiert die

durchgezogene Linie den Zeitraum der Datenerhebung, für den konkrete Daten zur Batteriekapazität vorliegen sowie die gestrichelte Linie die Prognose bei gleichbleibender Fahrzeugnutzung. Außerdem ist der SoH von 70 % markiert.

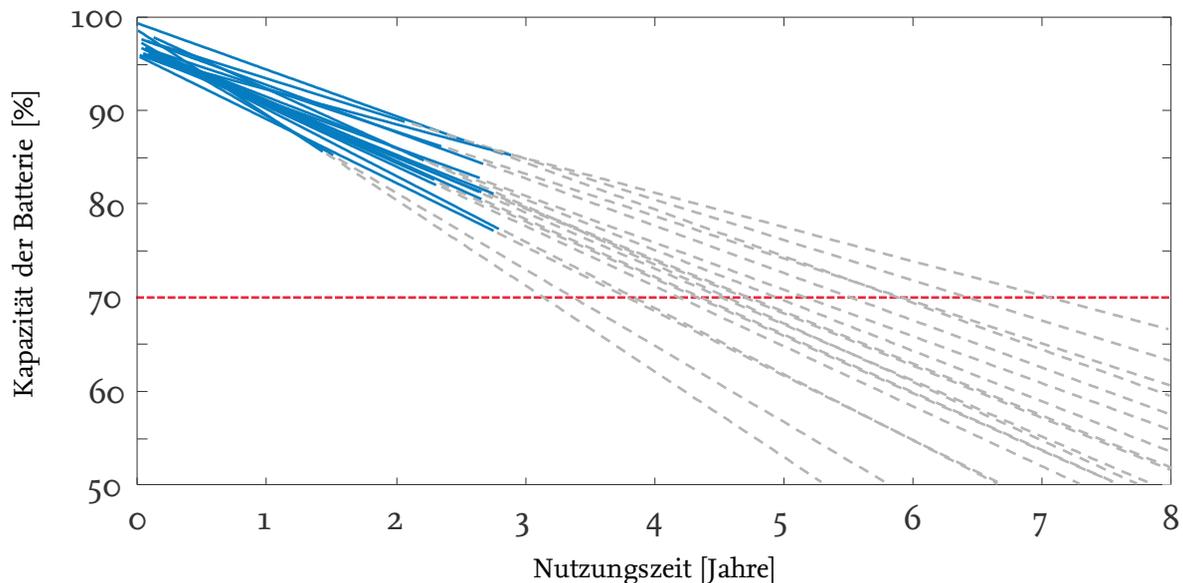


Abbildung 22: Lineare Näherung der Entwicklung der Batteriekapazität über der Nutzungszeit für die PHEV im ESD, die durchgezogenen Linien repräsentieren den Zeitraum, indem Messdaten erhoben wurden, die gestrichelten Linien entsprechen einer Prognose bei gleichbleibender Nutzung

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass ein hoher elektrischer Fahranteil (wie z. B. im ESD urban) die Batterie stärker schädigt. Der elektrische Fahranteil ist proportional zum elektrischen Energieverbrauch des Fahrzeugs. Je höher der elektrische Energieverbrauch, desto höher ist auch der elektrische Fahranteil. Damit steht die Lebensdauer der Batterie in einem Zielkonflikt mit einem ökologischen und wirtschaftlichen Betrieb der Fahrzeuge, welcher einen hohen elektrischen Fahranteil erfordert. Um die Fahrzeuge über einen Zeitraum von 6–8 Jahren mit einem SoH über 70 % nutzen zu können, sollte daher rechtzeitig die Nutzungsintensität reduziert werden, beispielsweise indem das Fahrzeug in nachgeordneten Dienststellen mit geringer Nutzungsintensität (z. B. ohne Schichtdienst) eingesetzt wird.

Bei den in den Szenarien KED sowie Stab & Fiskal eingesetzten PHEV und BEV ergibt sich bei gleichbleibender Nutzung eine prognostizierte Lebensdauer von zehn Jahren und mehr. Die Batterialterung ist für diese Anwendungsfälle folglich zu vernachlässigen.

8.1.2 Monitoring elektrifizierter Fahrzeuge im Fuhrpark

Eine wesentliche Aufgabe der Fuhrparksteuerung ist neben der Sicherstellung der Funktionsfähigkeit ein wirtschaftlicher und ökologischer Betrieb der Fahrzeuge. Dabei spielt der Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch eine maßgebliche Rolle. Im Gegensatz zu ICV oder BEV sind bei PHEV zwei Energieverbrauchswerte vorhanden: zum einen der Kraftstoffverbrauch und zum anderen der elektrische Energieverbrauch. Für einen ökologischen und ökonomischen Betrieb von PHEV sollte der Kraftstoffverbrauch möglichst klein und somit der elektrische Fahranteil möglichst hoch sein. Folglich ist der Kraftstoffverbrauch ein geeigneter Indikator, zum Monitoring der Fahrzeugnutzung. Bei den im Forschungsprojekt eingesetzten PHEV (Reichweite laut Hersteller 50 km) sind Kraftstoffverbräuche von unter 5,5 l/100 km möglich, sowohl in urbanen als auch in ruralen Anwendungsfällen. Dabei hat das konkrete Fahrprofil, insbesondere die Fahrtstrecke (bis zur Rückkehr an die Dienststelle) und die Standzeit, einen erheblichen Einfluss. Sind längere Distanzen zurückzulegen, steigt entsprechend der Kraftstoffverbrauch, da weniger elektrisch gefahren werden kann. Der Verbrauch wird maßgeblich von der Ladehäufigkeit und, falls vorhanden, der Nutzung eines Batterielade-Modus¹⁹ beeinflusst. Bei Fahrzeugen, die während mindestens 80 % der Standphasen an der Dienststelle geladen wurden und bei denen der Batterielade-Modus kaum genutzt wurde, waren auch Kraftstoffverbräuche unter 5 l, zum Teil sogar unter 4,5 l/100 km möglich. Demgegenüber stieg der Kraftstoffverbrauch bei Fahrzeugen mit seltener Ladung (bei weniger als 40 % der Standphasen wurde geladen) und bei intensiver Nutzung eines Batterielade-Modus auf bis zu ca. 7,5 l/100 km (rural) bzw. 8,5 l/100 km (urban) an.

Hinweis:

- Die Traktionsbatterie sollte nicht über einen ggf. vorhandenen Batterielade-Modus des Fahrzeugs geladen werden.
- Jede Standzeit an der Dienststelle sollte zum Laden genutzt werden („Standzeit ist Ladezeit“).

¹⁹ Nachladen der Batterie über den Verbrennungsmotor, vgl. hierzu auch Abschnitt 9.1.

8.2 Nutzung elektrifizierter Fahrzeuge im täglichen Gebrauch

Im täglichen Gebrauch der EV treten durch die Nutzenden immer wieder Fragen auf, die es aussagekräftig und möglichst umfassend zu beantworten gilt, um den Nutzenden Berührungsängste zu nehmen und die Akzeptanz der EV im Fuhrpark zu steigern. Insbesondere die Akzeptanz der Nutzenden hat einen wesentlichen Einfluss auf die positiven Effekte der Nutzung von elektrifizierten Fahrzeugen. Oftmals tasten sich die Nutzenden über den Gebrauch eines PHEV an einen BEV heran, da sie sich durch das Vorhandensein des vertrauten Verbrennungsmotors sicherer im Umgang mit dem Fahrzeug fühlen. Diesen Prozess gilt es eng zu begleiten, Fragen und Ängste ernst zu nehmen und die Antworten darauf möglichst breit zu kommunizieren.

Im Folgenden werden die häufigsten im Forschungsprojekt aufgetretenen Fragenstellungen dargestellt und beantwortet.

8.2.1 FAQ zum Betrieb elektrifizierter Fahrzeuge

Wie weit komme ich mit einem EV realistisch? Welches sind die höchsten Verbraucher, die meine Reichweite reduzieren?

Die tatsächliche Reichweite von BEV ist von verschiedenen Einflussparametern abhängig. Dies sind insbesondere die Fahrweise (schonend oder dynamisch) und die Fahrumgebung, bei der vor allem der Streckentyp sowie die Umgebungstemperatur großen Einfluss haben. Um die verschiedenen BEV-Modelle mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten vergleichen zu können, wird im Folgenden eine normierte Reichweite verwendet. Dazu wurde auf Basis des gemessenen Energieverbrauchs im Realbetrieb die Reichweite der Fahrzeuge bestimmt und auf die von den Herstellern angegebene Reichweite nach WLTP bezogen. Werte von weniger als 100 % bedeuten, dass die reale Reichweite entsprechend kleiner ist als die Angabe des Herstellers nach WLTP. Abbildung 23 zeigt die bezogene Reichweite der eingesetzten BEV für verschiedene Streckentypen.

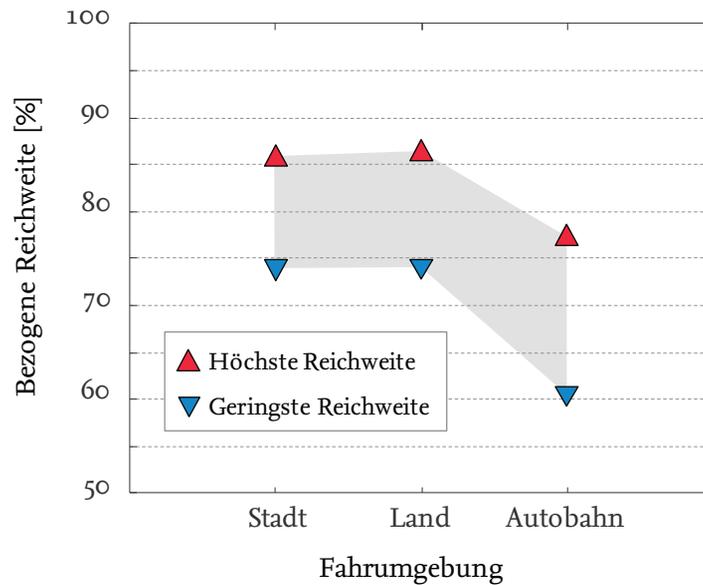


Abbildung 23: Auf die von den Herstellern angegebene Reichweite nach WLTP bezogene reale Reichweite bei unterschiedlichen Fahrumgebungen als Streuband der eingesetzten BEV-Modelle

Die Reichweite der BEV in städtischer und ländlicher Fahrumgebung unterscheidet sich nur geringfügig. In beiden Fällen liegt die Reichweite zwischen rund 75 % und etwa 85 % der Herstellerangabe nach WLTP. Bei Fahrten auf der Autobahn ist die reale Reichweite geringer, sie liegt zwischen ca. 60 % und rund 83 %. In dieser Betrachtung sind alle Temperaturen berücksichtigt. Diese hat ebenfalls einen sehr großen Einfluss auf die Reichweite, dies ist in Abbildung 24 gezeigt.

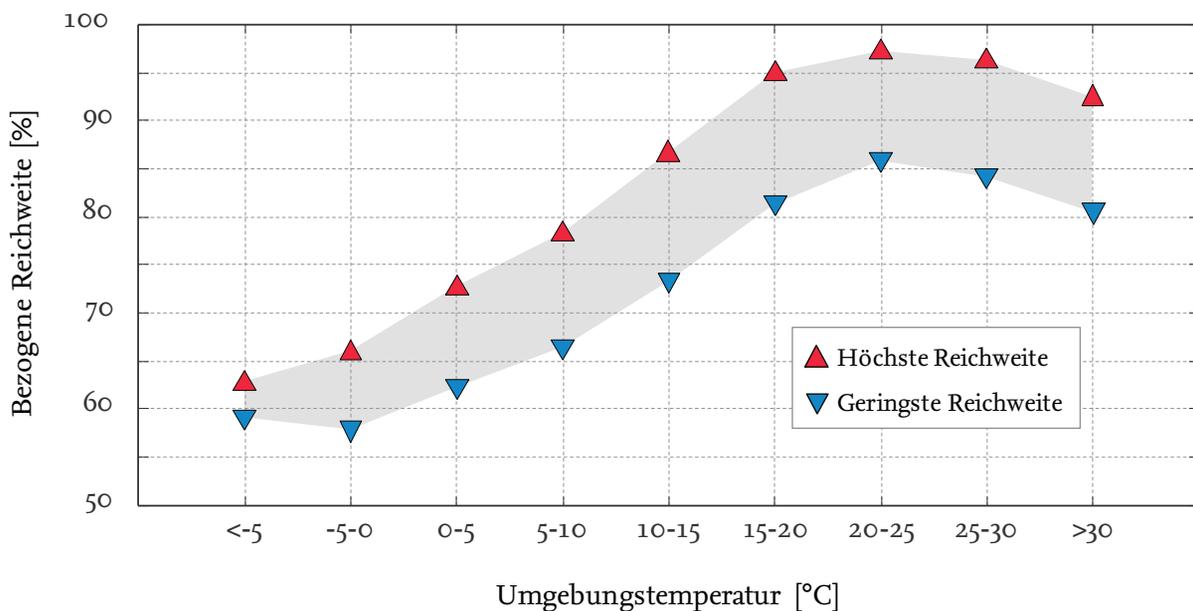


Abbildung 24: Auf die von den Herstellern angegebene Reichweite nach WLTP bezogene reale Reichweite bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen als Streuband der eingesetzten BEV-Modelle

Insbesondere im Winter bei niedrigen Umgebungstemperaturen verringert sich die Reichweite von BEV erheblich. Bei Temperaturen von weniger als 0°C sinkt die reale Reichweite zum Teil auf weniger als 60 % der Herstellerangabe nach WLTP. Der Einfluss von hohen Temperaturen ist demgegenüber deutlich kleiner. Bei Temperaturen zwischen 15 und 30°C werden die größten Reichweiten erzielt, bis zu über 95 % der Herstellerangabe nach WLTP. Die geringeren Reichweiten bei kalten Temperaturen sind vor allem auf den Energieverbrauch zum Heizen des Fahrzeugs zurückzuführen. Der obere Bereich des Streubands, sprich die größten relativen Reichweiten, wurden von einem Fahrzeugmodell mit Wärmepumpe erzielt. Diese verringert besonders bis etwa 0°C den Energieverbrauch zum Heizen. Den Einfluss der Nebenverbraucher zeigt Abbildung 25 mit den Anteilen von Antrieb, Klimatisierung (Heizung und Klimaanlage) und 12V-Netz am Gesamtenergieverbrauch für das Fahrzeugmodell mit Wärmepumpe bei verschiedenen Umgebungstemperaturen.

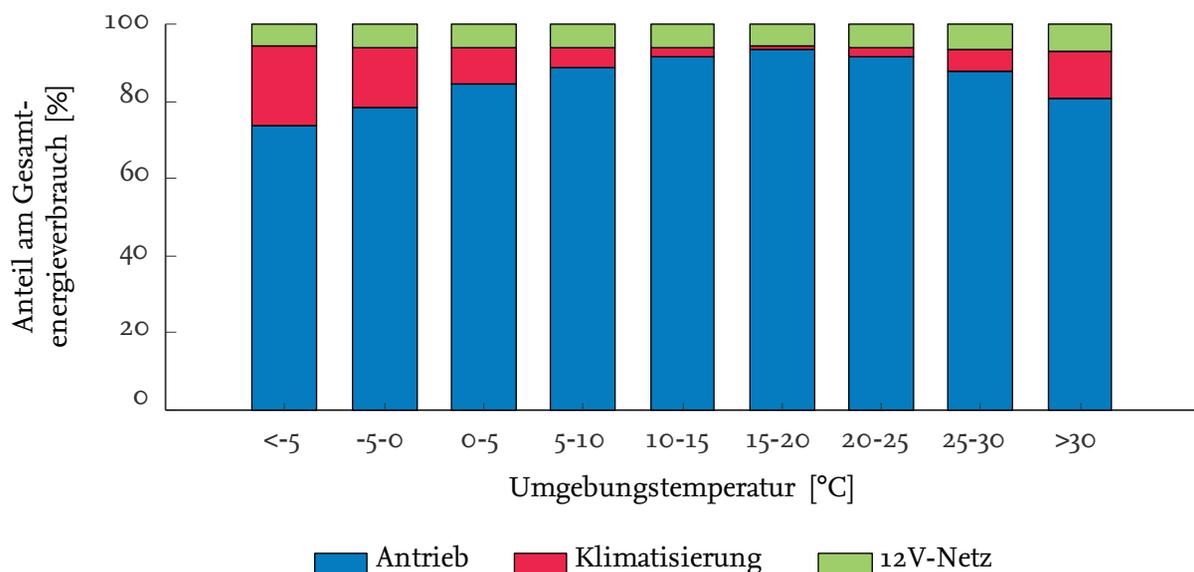


Abbildung 25: Anteile von Antrieb, Klimatisierung und 12V-Netz am Gesamtenergieverbrauch bei verschiedenen Umgebungstemperaturen

Der Anteil der Klimatisierung am Gesamtenergieverbrauch steht bei niedrigen und hohen Temperaturen an. Bei weniger als -5°C sind über 20 % des Gesamtenergiebedarfs auf die Klimatisierung des Innenraums zurückzuführen, wohingegen zwischen 15 und 20°C der Anteil bei nur rund 1 % liegt. Die Reichweite des Fahrzeugs ist dementsprechend deutlich verringert. Für die Versorgung des 12V-Bordnetzes ist ein relativ konstanter Anteil von ca. 6 % der Energie erforderlich.

Welches Fahrzeug soll ich für einen Fahrauftrag wählen?

BEV sind aus ökologischer und ökonomischer Sicht für alle durchzuführenden Fahrten die beste Wahl. Aus funktionaler Sicht ist zu prüfen, ob insbesondere bei dringlichen Fahrten auch ein BEV genutzt werden kann. Ein ICV bzw. PHEV ist grundsätzlich für alle Fahrten einsetzbar. Auch bei Fahrten über lange Strecken ist ein BEV ökologisch und ökonomisch besser als ein ICV oder PHEV zu bewerten, jedoch sind je nach Reichweite Ladepausen erforderlich. Dies erhöht entsprechend die Reisezeit. Als Alternative zum BEV ist aus ökologischer Sicht ein PHEV sinnvoller, aus ökonomischer Sicht entweder ein Diesel-ICV oder PHEV. Anhand des nachfolgenden Beispiels wird dies verdeutlicht.

Unter Zugrundelegung einer realen Fahrt aus dem Anwendungsfall KED über eine Distanz von ca. 340 km wurde ein simulativer Vergleich zwischen verschiedenen Antriebsarten durchgeführt. Verglichen wurden je ein ICV bzw. PHEV mit Benzin- und Dieselmotor sowie ein BEV. Die Antriebsleistung der Fahrzeuge war in etwa gleich. Beim BEV wurde eine Batteriekapazität von 80 kWh angenommen, bei den PHEV von 8 kWh. Abbildung 26 zeigt die simulierten CO₂-Emissionen sowie Energiekosten der drei Antriebskonzepte.

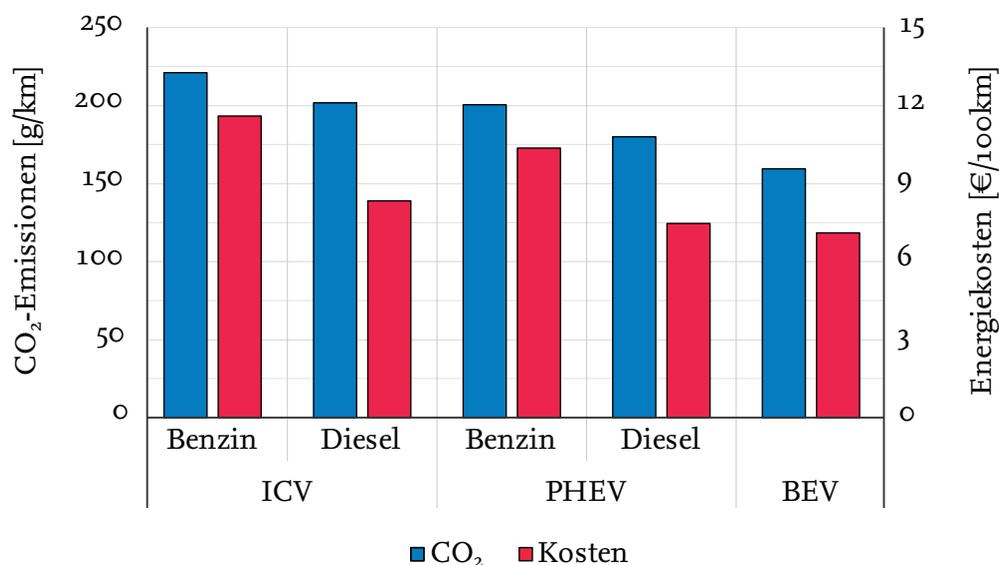


Abbildung 26: CO₂-Emissionen²⁰ und Energiekosten²¹ als Ergebnis einer Simulation verschiedener Antriebskonzepte für eine beispielhafte Realfahrt über eine Distanz von 340 km im Anwendungsfall KED

²⁰ Benzin: 2,72 kg CO₂/l, Diesel: 3,1 kg CO₂/l, elektrische Energie: 474 g/kWh

²¹ Benzin: 1,43 €/l, Diesel: 1,28 €/l, elektrische Energie: 0,21 €/kWh

Hinsichtlich der CO₂-Emissionen und Energiekosten ist das BEV vorteilhaft. Die angenommene Batteriekapazität reicht jedoch nicht aus, um die Strecke ohne Zwischenladen zu absolvieren. Unter der Annahme, dass die Nachladung mit einer mittleren Ladeleistung von 100 kW durchgeführt wird, würde sich die Reisezeit um ca. 0,5 h verlängern, bei einer Gesamtdauer der Fahrt ohne Ladestopp von ca. 3,1 h. Die PHEV weisen gegenüber den ICV geringere CO₂-Emissionen auf, das Diesel-PHEV außerdem auch die nach dem BEV geringsten Energiekosten. Aus Kostengesichtspunkten wäre ein Diesel-ICV gegenüber einem Benzin-PHEV für diese Fahrt zu bevorzugen.

Welche Besonderheiten und Einschränkungen gilt es im Alltag zu berücksichtigen?

Bei EV sind keine grundsätzlichen Einschränkungen im Alltag zu berücksichtigen. Wie zuvor erwähnt ist bei der Verwendung von BEV bei z. B. Großeinsätzen eine geeignete LIS bereitzustellen, beispielsweise in Form von mobilen Schnellladestationen. PHEV sind diesbezüglich unkritisch, da aufgrund des Verbrennungsmotors die Verfügbarkeit gewährleistet ist.

Insbesondere im Rahmen von Fahrtrainings ist bei den eingesetzten PHEV ein verändertes Handling gegenüber den ICV festgestellt worden. Vor allem bei schnellen Kurvenfahrten sowie beim Anfahren gibt es Unterschiede. Diese sind zurückzuführen auf

- das höhere Gesamtgewicht der PHEV (ca. 200 kg),
- eine andere Gewichtsverteilung (Verschiebung des Schwerpunkts in Richtung der Hinterachse),
- die serienmäßigen Energiesparreifen,
- das höhere und schneller zur Verfügung stehende Drehmoment des Antriebs.

Nutzende sollten auf diese Änderungen im Rahmen der Einweisung in das Fahrzeug hingewiesen werden und idealerweise bei Fahrtrainings das entsprechende Fahrzeugmodell nutzen.

Wie in Abschnitt 9.3 beschrieben, sinkt bei entladener Batterie die Antriebsleistung. Bei PHEV steht dann ggf. maximal nur noch die Leistung des Verbrennungsmotors zur Verfügung. Dies hat sich im Alltag jedoch nicht als Einschränkung erwiesen.

Wann soll ich laden?

EV sollten wann immer es möglich ist geladen werden. Es gilt der Grundsatz: „Standzeit ist Ladezeit!“

Warum soll ich auch ein PHEV extern laden?

Standzeit ist Ladezeit. Dies gilt nicht nur für BEV, sondern auch für PHEV, da das externe Laden von PHEV sowohl aus wirtschaftlicher als auch ökologischer Sicht von großer Wichtigkeit ist. Am Beispiel von zwei Projektfahrzeugen im ESD urban lässt sich dies verdeutlichen. Aufgrund von Sanierungsarbeiten der Dienststelle kam es bei einem Fahrzeug zu einem Standortwechsel. Am neuen Standort stand keine Lademöglichkeit zur Verfügung. Dies hatte unmittelbar Einfluss auf den elektrischen Energieverbrauch sowie den Kraftstoffverbrauch und folglich auf die CO₂-Emissionen und Kosten der Fahrzeuge. Abbildung 27 zeigt diese Parameter für ein vergleichbares, ebenfalls im ESD urban eingesetztes Fahrzeug mit Lademöglichkeit (A) sowie das Fahrzeug ohne Lademöglichkeit (B).

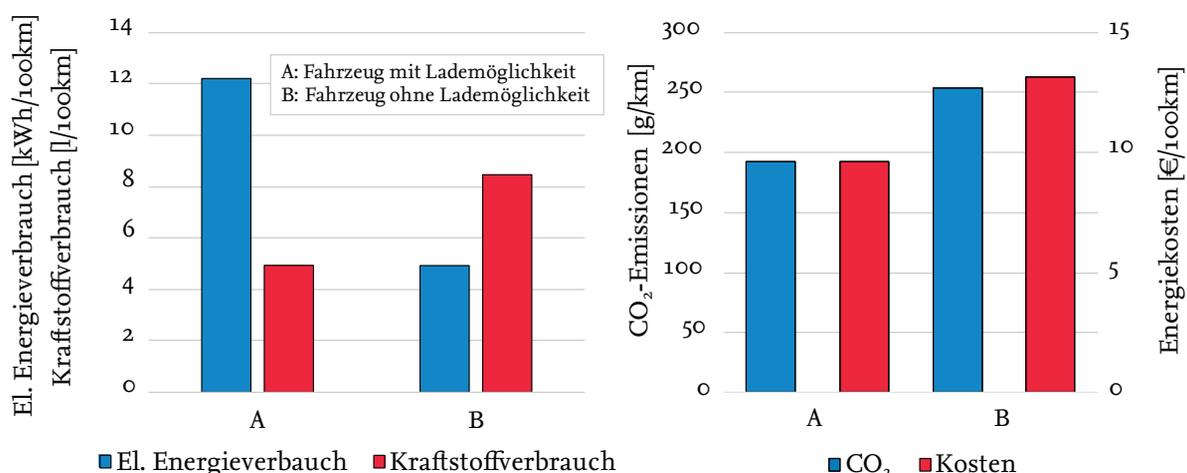


Abbildung 27: Vergleich von elektrischem Energieverbrauch, Kraftstoffverbrauch, CO₂-Emissionen und Energieträgerkosten von zwei Fahrzeugen im ESD urban, Fahrzeug A mit Lademöglichkeit und Fahrzeug B ohne Lademöglichkeit

Hinsichtlich des elektrischen Energieverbrauchs, des Kraftstoffverbrauchs weisen die beiden Fahrzeuge ein gegensätzliches Verhalten auf und der Einfluss des externen Nachladens der Batterie auf den Verbrauch von PHEV wird deutlich. Während Fahrzeug A einen Kraftstoffverbrauch von knapp unter 5 l/100 km bei einem elektrischen Energieverbrauch von ca. 12 kWh/100 km aufweist, beträgt der Kraftstoffverbrauch von Fahrzeug B ca. 8,5 l/100 km zuzüglich ca. 5 kWh/100 km elektrischer Energie. Dies führt zu einem um fast 50 g/km (27 %) höheren CO₂-Ausstoß²². Dabei ist das Fahrprofil von Fahrzeug B von einem höheren Anteil kurzer Strecken geprägt, welche einen hohen elektrischen Fahranteil ermöglichen würden. Zugleich steigen die Energiekosten²³ des Fahrzeugs um ca. 3,50 €/100 km (37 %).

Was ist bei Unfällen, Rettung und Pannen zu beachten?

Bei EV gibt es viele Unsicherheiten bezüglich der Gefahr nach Unfällen, insbesondere im Hinblick auf die Möglichkeit eines elektrischen Schlags bei Berührung der Karosserie sowie der Brandgefahr. Untersuchungen von Versicherungen²⁴ sowie des deutschen Feuerwehrverbands²⁵ haben gezeigt, dass es sowohl hinsichtlich der Brandgefahr als auch des Gefährdungspotenzials bei einem Brand keinen Unterschied zwischen EV und ICV gibt.

EV sind mit Schutzrelais (auch Schütze genannt) ausgestattet, die die Verbindung zwischen Hochvoltbatterie und dem Bordnetz herstellen. Solange das Fahrzeug nicht in Betrieb ist (Zündung aus), sind die Schutzrelais geöffnet, sodass die Verbindung zur Batterie getrennt und das Bordnetz spannungsfrei ist. Die Verbindung kann nicht nur durch Deaktivieren der Zündung, sondern auch durch die Sicherheitssysteme des Fahrzeugs unterbrochen werden. Kommt es zu einem Unfall und es werden die Gurtstraffer oder Airbags aktiviert, werden automatisch die Schutzrelais geöffnet und das Hochvoltbordnetz abgeschaltet. Darüber hinaus sind die Hochvoltleitungen des Fahrzeugs mit einer sogenannten Pilotlinie versehen, welche dazu dienen, Unterbrechungen in

²² Benzin: 2,72 kg CO₂/l, Diesel: 3,1 kg CO₂/l, elektrische Energie: 474 g/kWh

²³ Benzin: 1,43 €/l, elektrische Energie: 0,21 €/kWh

²⁴ Vgl. AXA (2019).

²⁵ Vgl. FVBG (2018).

den Leitungen festzustellen. Wird eine Unterbrechung detektiert, werden ebenfalls die Schutzrelais geöffnet und das Hochvoltssystem abgeschaltet. Aufgrund dieser Sicherheitsmaßnahmen ist bei einem Unfall sichergestellt, dass das Hochvoltssystem zuverlässig abgeschaltet wird und keine Gefahr von der Berührung der Karosserie des Fahrzeugs ausgeht.

Beim Abschleppen von EV sind unbedingt die Vorgaben des Herstellers zu beachten. In der Regel müssen EV verladen werden, lediglich das Abschleppen über kurze Distanzen ist unter Umständen zulässig. Andernfalls kann die Fahrzeugelektronik beschädigt werden.

Kann sich bei EV die 12 V-Batterie entladen und lassen sie sich dann noch starten?

Wie bei ICV kann sich auch bei EV die 12V-Batterie entladen. Grund dafür ist, dass die Schutzrelais der Hochvolt-Batterie bei abgeschalteter Zündung geöffnet sind und somit keine Verbindung zwischen 12V-Bordnetz und Hochvolt-Batterie besteht. Daher entladen bei abgeschalteter Zündung eingeschaltete Verbraucher wie die Sondersignal- und die Funkanlage die 12V-Batterie. Bei entladener 12V-Batterie ist ein Starten des Fahrzeugs nicht möglich, da zum erforderlichen Schließen der Schutzrelais der Hochvolt-Batterie eine Versorgung mit 12V benötigt wird.

Hat ein PHEV auch eine Motorweiterlauf-Schaltung?

In konventionellen Einsatzfahrzeugen sind (teilweise) Motorweiterlauf-Schaltungen (MWS) verbaut, die es ermöglichen, den Verbrennungsmotor beim Verlassen und Verriegeln des Fahrzeugs weiterlaufen zu lassen. Damit werden die eingeschalteten Verbraucher (Sondersignal-Anlage, Funk) weiterhin mit Strom versorgt und ein Entladen der 12V-Batterie verhindert.

Diese Funktion konnte bislang in den zurzeit im Einsatz befindlichen PHEV nicht realisiert werden, was zur Folge hat, dass sich die 12V-Batterie entleert, während die Hochvolt-Batterie keine Energie verliert. Mit den angekündigten Produktaufwertungen wird es bei einigen Modellen möglich sein, diese Funktion wieder darzustellen.

Verringert sich die mögliche Zuladung bei einem PHEV/BEV gegenüber einem vergleichbaren ICV?

Ein konventioneller Funkstreifenwagen²⁶ hat ein Eigengewicht von 1.579 kg und eine technisch zulässige Gesamtmasse von 2.180 kg²⁷. Im Vergleich dazu besitzt der Funkstreifenwagen als PHEV-Version²⁸ ein Eigengewicht von 1.735 kg und eine technisch zulässige Gesamtmasse von 2.250 kg²⁹.

Demnach hat ein ICV des oben benannten Modells eine Zuladung von 601 kg und ein PHEV von 515 kg. Die mögliche Zuladung bei einem PHEV ist somit tatsächlich um 86 kg verringert.

8.2.2 Polizeitaktische Vor- und Nachteile

Es stellt sich häufig die Frage, welche spezifischen Vor- oder Nachteile EV für den polizeitaktischen Einsatz im Vergleich zu ICV haben³⁰. Für BOS, hier am Beispiel der Polizei, ließen sich folgende grundsätzliche Vorteile feststellen:

- Verschiedene Betriebsmodi und Leistungsstufen (bei PHEV)
- Geringere Geräuschemissionen und dadurch lautloses Heranfahren an Ereignisorte
- Hohe Beschleunigungsfähigkeit
- Rekuperation (das hohe Fahrzeuggewicht inkl. Zuladung wird kompensiert)
- Umfangreiche Komfort- und Sicherheitsausstattung der Fahrzeuge

Daneben ließen sich jedoch auch folgende Nachteile feststellen:

- Geringere Reichweite
- Temperaturabhängige Schwankungen der Reichweite
- Längere "Tankzeit" zum Nachladen
- Fehlende Motorweiterlaufsteuerung (MWS)

²⁶ Hier am Beispiel eines VW Passat TDI

²⁷ Vorliegende Zulassungsdaten eines bereits eingesetzten Fahrzeugs

²⁸ Hier am Beispiel eines VW Passat GTE

²⁹ Vorliegende Zulassungsdaten eines bereits eingesetzten Fahrzeugs

³⁰ Nach dem Stand der Technik bis Modelljahr 2019.

- Abweichendes Fahrzeughandling bei Einsatzfahrten
- Zusätzlicher Zeit-/Handlingsaufwand durch das Trennen des Fahrzeugs vom Ladepunkt insbesondere bei eiligen Einsatzfahrten
- Wallbox und Kabel sind zu allen Jahreszeiten der Witterung ausgesetzt; Stecker werden nass und können am Fahrzeug festfrieren (Folge ist ein temporärer Fahrzeugausfall)
- Teilweise lange Ladekabel um das Fahrzeug, je nach Parkposition, Standort des Ladepunkts und Lademöglichkeit am Fahrzeug (Sturzgefahr)

8.3 Besonderheiten bei der Wartung und Instandsetzung elektrifizierter Fahrzeuge

Im folgenden Abschnitt soll die Frage beantwortet werden, welche Maßnahmen in polizeieigenen Werkstätten getroffen werden sollten, um ein sicheres und problemloses Arbeiten an HV-Fahrzeugen gewährleisten zu können und was hierbei zu beachten ist.

Die Wartung und Instandsetzung von EV bzw. Hochvoltsystemen in polizeieigenen Werkstätten birgt ein neues Gefährdungspotenzial. Die Gefahr eines elektrischen Schlages oder eines Lichtbogens waren in dieser Form bisher nicht vorhanden. Um den Betrieb in den polizeieigenen Werkstätten weiterhin zu gewährleisten und ein sicheres Arbeitsumfeld zu sichern, muss eine Umstrukturierung und eine Weiterbildung von Mitarbeitenden stattfinden.

8.3.1 Sicherheitsregeln und Qualifizierung von Personal

Eine Voraussetzung, damit in polizeieigenen Werkstätten Wartungen an EV durchgeführt werden dürfen, ist unter anderem die Einrichtung eines sichtbar abgetrennten Hochvolt-Arbeitsplatzes. Dieser Gefahrenbereich muss durch eine Beschilderung und Absperrungen gekennzeichnet werden.

Bevor Arbeiten an einem Hochvoltsystem durchgeführt werden dürfen, sollten die folgenden Sicherheitsregeln³¹ beachtet und in der richtigen Reihenfolge durchgeführt wer-

³¹ Vgl. DGUV (2012).

den. Die Regeln eins bis drei müssen hierbei angewendet werden, die Regel vier und fünf je nach Einzelfall.

1. Freischalten.

Für EV bedeutet dies zum Beispiel Zündung ausschalten, Sicherungen ziehen oder den Ladestecker ziehen.

2. Gegen Widerstand absichern.

Die Wiederinbetriebnahme des HV-Systems wird verhindert, solange die Arbeiten stattfinden. Dies kann zum Beispiel durch das Wegschließen des Zündschlüssels oder das Aufstellen von Warnschildern geschehen.

3. Spannungsfreiheit feststellen.

Da auch bei abgeschalteten HV-Systemen Restladung vorhanden sein kann, muss die Spannungsfreiheit an allen leitfähigen Teilen nachgewiesen und dokumentiert werden. Dies darf nach Unfallverhütungsvorschrift (BGV/GUV-V A3) nur durch eine Elektrofachkraft geschehen.

4. Erden und kurzschließen.

5. Benachbarte unter Spannung stehende Teile werden ordnungsgemäß abgedeckt oder abgeschränkt.

Jegliche Arbeit an HV-Fahrzeugen darf zudem nur durch entsprechend eingewiesene Fachkräfte durchgeführt werden. Hierbei werden folgende Arbeiten³² unterschieden:

Um kleine Instandsetzungsarbeiten, wie das Nachfüllen von Scheibenwischwasser, das Auswechseln der Scheibenwischblätter oder Ähnliches durchzuführen reicht es aus, wenn die Werkstattmitarbeitenden auf die fahrzeugspezifischen Eigenschaften der HV-Fahrzeuge hingewiesen werden und auf die zu beachtenden Besonderheiten eingewiesen werden. Diese Arbeitenden dürfen keine Arbeiten am HV-System durchführen.

³² Vgl. DGUV (2012).

Um nichtelektronische Arbeiten wie zum Beispiel Karosseriearbeiten, Rad- oder Bremswechsel oder auch um Arbeiten am konventionellen Bordnetz eines HV-Fahrzeugs durchführen zu dürfen, müssen die Mitarbeitenden über Gefährdung, Schutz- und Verhaltensregeln hinsichtlich der elektrischen Gefährdung unterwiesen werden. Diese Unterweisung muss dokumentiert werden. Inhalte einer solchen Unterweisung können in der DGUV Information 200–005 nachgelesen werden.

Die dritte Qualifizierungsstufe ermächtigt zur Durchführung von elektrotechnischen Arbeiten an einem HV-Fahrzeug. Der Umfang dieser Schulung hängt davon ab, welche Vorkenntnisse die einzuweisende Person bereits hat und wie groß die elektrische Gefährdung der Arbeiten ist.

Eine vorherige abgeschlossene Berufsausbildung als Kfz-Mechaniker, Kfz-Elektriker oder eine ähnliche Ausbildung ist von Vorteil, wodurch nur eine zusätzliche Qualifizierung für das Arbeiten an HV-Systemen erforderlich ist. Um diese Qualifizierung zu erhalten, muss ein theoretischer sowie praktischer Nachweis der erworbenen Fähigkeiten und Kenntnisse erbracht und dokumentiert werden.

Weitere und detaillierte Informationen, sind hierzu in der DGUV Information 200–005 genau beschrieben. Hier ist geregelt, wie einzuweisende Personen mit oder ohne Vorkenntnisse qualifiziert werden müssen.

Weiterführende Informationen zu Arbeiten an Fahrzeugen mit HV-System sowie der Qualifizierung von Werkstattmitarbeitenden sind zudem in folgenden Vorschriften festgelegt:

- Arbeitsschutzgesetz
- DGUV Vorschrift 4 – Elektrische Anlagen und Betriebsmittel
- VDE Bestimmungen
- DGUV Information 200–005 – Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen
- DIN VDE 0105–100 “Betrieb von elektrischen Anlagen”
- DIN VDE 1000–10 “Anforderungen an die im Bereich Elektrotechnik tätigen Personen”

Nach Erfahrungen der polizeieigenen Werkstätten in Niedersachsen sollten pro Werkstatt mindestens zwei Personen dazu ausgebildet werden, an EV technische Arbeiten durchzuführen (Vertreterregelung) um einen reibungslosen Betrieb sicherstellen zu können.

8.3.2 Umgang mit beschädigten elektrifizierten Fahrzeugen

Der Umgang mit beschädigten oder verunfallten Fahrzeugen stellt eine besondere Aufgabe dar. Grundsätzlich sind EV mit mehreren, voneinander unabhängigen Schutzmechanismen ausgestattet, die das HV-System bei einem Unfall sofort von der Karosserie trennen. Dies geschieht zum Beispiel, durch die Auslösung des Airbags, das Auslösen des Gurtstraffers und zusätzlicher Crash-Sensoren. Erst wenn diese Systeme gleichzeitig ausfallen, kann es zu einer Gefahrensituation kommen.³³ Allerdings gibt es keine absolute Sicherheit, dass ein EV nach einem Unfall spannungsfrei ist. Hierzu ist es notwendig das HV-System manuell zu deaktivieren. Dies sollte nur durch ausgebildete Fachkräfte geschehen.³⁴ Es besteht zudem die Möglichkeit das HV-System manuell zu trennen. Dieses Vorgehen ist dem Rettungsdatenblatt des jeweiligen Fahrzeugs zu entnehmen.

Bei verunfallten EV besteht die größte Gefahr darin, dass die Batterie beschädigt wurde und diese anfängt zu brennen. Anzeichen sind hierfür ein Aufblähen der Batterie, ausgelaufene Flüssigkeit (Elektrolyt) oder eine starke Hitze- bzw. Rauchentwicklung. Durch interne Kettenreaktionen (Thermal Runaway) kann ein defekter Akku auch erst zu einem späteren Zeitpunkt anfangen zu brennen. Grundsätzlich sollte bei einem Batteriebrand, diese möglichst schnell gekühlt werden (zum Beispiel mittels Wasser) um die Wärme abzuleiten.

³³ Vgl. Schleich (2020).

³⁴ Vgl. BGV (2019).

Informationen zum richtigen Verhalten bei brennenden EV bietet die DGUV Information 205–022 „Rettungs- und Löscharbeiten an Pkw mit alternativen Antrieben“. Weitere detaillierte Informationen zum richtigen Verhalten bei Unfällen mit EV sind in folgenden Vorschriften und Richtlinien ausführlich beschrieben:

- Flyer BG Verkehr „Pannen- und Unfallhilfe an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen
- DGUV FAQ-Liste der AG „Handlungsrahmen Elektromobilität“

Verladen und Transport

Das Verladen und der Transport eines unbeschädigten EV sind grundsätzlich unbedenklich. Allerdings sollte man immer qualifizierte Abschleppfirmen beauftragen, deren Mitarbeitende mindestens die Qualifizierungsstufe 1 besitzen, um nichtelektronische Arbeiten an HV-Fahrzeugen durchführen zu dürfen.

Bei einem verunfallten EV muss vor dem Transport das HV-System freigeschaltet werden. Erst dann ist es „gesichert“ und darf Verladen werden³⁵.

Sollte das HV-System beschädigt sein und das Fahrzeug nicht mehr als „gesichert“ eingestuft werden können, muss durch einen Mitarbeitenden des Bergungsunternehmens mit der Sicherheitsstufe 2 (technische Arbeiten an einem HV-Fahrzeug nach DGUV Information 200–005) Spannungsfreiheit an dem Fahrzeug hergestellt werden und es darf erst danach verladen werden.

Wenn augenscheinlich eine Beschädigung des Akkus vorliegt ist ein Mitarbeitender der Qualifizierungsstufe 3 hinzuzuziehen, der auch an unter Spannung stehenden HV-Systemen arbeiten darf. Erst wenn er diesen das Fahrzeug spannungsfrei geschaltet hat, darf es verladen werden³⁶.

Bei dem Transport eines EV sollten immer Plateaufahrzeuge verwenden, um Schäden am Elektrosystem zu vermeiden.

³⁵ Vgl. Schleich (2020).

³⁶ Vgl. Schleich (2020).

Bei dem Verladen und bei dem Transport sind folgende Normen und Vorschriften zu beachten:

- DGUV Information 214-010
- DGUV Information 205-022
- DGUV Information 214-081
- Flyer der BGV „Unfallhilfe & Bergen bei Fahrzeugen mit Hochvolt-Systemen

sowie die ADR-Vorschriften (Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par route – Europäisches Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße).

Im Gegensatz zum Verladen, unterliegen BEV und PHEV beim Abtransport nicht der ADR. Das Transportunternehmen hat die Verkehrssicherheit des Transports sicherzustellen³⁷.

Verwahren/Abstellen verunfallter EV

Ebenso wie verunfallte ICV sollten verunfallte EV aus Brandschutzgründen auf einem Abstellplatz im Freien, mit ausreichendem Abstand zu anderen Fahrzeugen oder Gebäuden abgestellt werden. Da beschädigte Batterien auch erst nach einer gewissen Zeit anfangen können zu brennen, besteht bei EV hier noch eine größere Gefährdung.

Allerdings gibt es hierzu derzeit keine speziellen Vorschriften oder Richtlinien. Lediglich Opel schreibt vor, dass 15 m Abstand zu brennbaren Materialien bestehen muss³⁸. Wenn vorhanden, können verunfallte EV auch in dafür vorgesehene Brandschutzsysteme gelagert werden. Der Bereich in dem ein verunfalltes EV abgestellt wird, muss zudem abgesperrt und gekennzeichnet werden. Sollten HV-Komponenten beschädigt sein und frei liegen, ist es empfehlenswert, diese durch eine wetterfeste Plane zu schützen.

³⁷ Vgl. DGUV (2016).

³⁸ Vgl. Schleich (2020).

Weitere Informationen zum korrekten Abstellen von EV sind den folgenden Vorschriften zu entnehmen:

- www.vdik.de/arbeitsgebiete/technik/unfallhilfe-ampbergen.html
- www.adac.de/infotestrat/ratgeber-verkehr/sicher-unterwegs/rettungskarte/

8.4 Betrieb von Ladeinfrastruktur

Der Betrieb der im Projekt realisierten polizeieigenen LIS war durch geringen Arbeitsaufwand und überwiegend störungsfreie Funktionalität gekennzeichnet und führte zu der Erkenntnis, dass die Aufwände nach Installation der Anlagen im Wesentlichen von den Vorbereitungen in der Planungsphase abhängen. Je detaillierter hier gearbeitet wird, desto überschaubarer und kalkulierbarer sind die anschließenden Betriebsaufwände. Gut markierte Stellplätze und Hinweisschilder verhindern das Zuparken durch unberechtigte Fahrzeuge. Klar festgelegte Zuständigkeiten gewährleisten eine einwandfreie Ladedisposition der Fahrzeuge und bieten den Nutzern jederzeit Ansprechpartnerinnen und -partner. Beschriebene Prozessketten erleichtern das Verständnis und die Transparenz für Anwender. Eine vorgeschaltete Einweisung der Nutzer kann Anwendungsfehler minimieren und wird daher dringend empfohlen. Die häufigste Ausfallursache der LIS waren defekte Kommunikationsdrähte in den Ladekabeln, herbeigeführt durch das Überfahren dieser, nach unterlassenem Aufrollen der Ladekabel. Die folgenden Abschnitte sollen auf die am häufigsten auftretenden Betriebsaufwände beleuchten.

8.4.1 Regelmäßige Betriebsaufwände

Nach der Unfallverhütungsvorschrift DGUV Vorschrift 3 „Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“ sind während des Betriebes regelmäßige Sicherheitsüberprüfungen durchzuführen und zu protokollieren. Nach DIN VDE 0105-100 (Anlagenprüfung) sollen diese Prüfungen in der Regel mindestens alle vier Jahre durchgeführt werden. Bei starker Beanspruchung der LIS können kürzerer Prüfungsintervalle genauso nötig werden wie durch explizite Herstellervorgaben. Die Wartungsaufwände variieren also je nach Beschaffenheit und Art der LIS.

Die Hersteller von LIS bieten Wartungs- und Sicherheitsüberprüfungen häufig im Rahmen von Wartungsverträgen mit an. Im Rahmen der Beschaffungsausschreibung können diese Arbeiten bei Bedarf gleich mit ausgeschrieben werden. Alternativ können diese Arbeiten auch von Fachfirmen vor Ort oder eigenen geschulten und autorisierten Fachkräften durchgeführt werden. Auf jeden Fall sollte aber die Zuständigkeit für die Überwachung dieser Prüfungen festgelegt werden. Im Rahmen des Projekts wurde dies durch die Fachkraft für Elektrosicherheit in den jeweiligen Behörden gewährleistet.

Wurde ein Lademanagement integriert, ist die regelmäßige Prüfung der Funktionalität notwendig. Diese kann intern stattfinden oder an den Backendbetreiber übertragen werden. Mit der Anzahl an EV steigen die Steuerungsmöglichkeiten, somit kann ein Lademanagement mit mehr EV zusätzliche Potentiale nutzen. Aus diesem Grund sollte nach einer Änderung der EV-Flottengröße kontrolliert werden, ob das eingesetzte Lademanagement weiterhin die beste Strategie anwendet.

Die Erfassung und Abrechnung der verbrauchten elektrischen Energie kann aus unterschiedlichen Gründen nötig werden. Haushalterische Zwänge, Möglichkeiten des Privat- oder Mitarbeiterladens oder nicht zuletzt Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich des Energiemanagements können den Einsatz eines Erfassungs- und Abrechnungssystems erforderlich machen. Die Erfassung kann entweder analog durch Ablesen oder automatisiert an der LIS oder am Fahrzeug erfolgen. Die Erfassung der Energiemengen im Projektzeitraum wurde fahrzeugseitig durch Datenlogger gewährleistet. Soll die Erfassung über die LIS abgebildet werden, kommt häufig ein elektronisches Erfassungssystem zum Einsatz. Fragen der IT-Sicherheit und des Datenschutzes sind hier im Vorfeld zu klären. Die Hersteller von LIS bieten hier je nach Kundenwunsch vielfältige Lösungsmöglichkeiten bis hin zur, auch im öffentlichen Raum nutzbaren, lizenzierten und eichrechtskonformen Abrechnung an. Hierfür fallen meist regelmäßig wiederkehrende Kosten an. In diesem Fall sollte direkt im Rahmen der Ausschreibung der Beschaffung eine Abrechnungsoption berücksichtigt werden. Für die alleinige dienstliche Nutzung von LIS für BOS im nichtöffentlichen Raum sind umfangreiche und aufwendige Abrechnungssysteme aus hiesiger Sicht nicht erforderlich. Hier genügt die automatisierte Erfassung der verbrauchten Energiemenge.

8.4.2 Störungs- und Notfallmanagement

Störungen und längere Ausfallzeiten führen nicht nur zu einer Absenkung der Nutzerakzeptanz, sondern können schlimmstenfalls zum Ausfall der Mobilität und damit zur Nichterfüllung hoheitlicher Aufgaben führen. Um diese Risiken zu minimieren wird die Erstellung eines begleitenden Störungs- und Notfallkonzepts empfohlen. Folgende Fragestellungen sollten darin Berücksichtigung finden:

- Wer ist erster Ansprechpartner für den Anwender?
- Welche maximalen Ausfallzeiten sind hinnehmbar?
- Störungsannahme nur zu Geschäftszeiten oder 24/7?
- Wer ist zuständig für die Beauftragung und Überwachung der Reparatur?

Für die Störungsbeseitigung ist insbesondere bei BOS der Zeitfaktor entscheidend. Auch hier kann der Abschluss von Service-Verträgen sinnvoll sein, in dem ein Zeitrahmen für die Störungsbeseitigung vereinbart wird. Eine Fehlerbehebung innerhalb von 24 Stunden wird empfohlen, insbesondere wenn die LIS im Bereich des 24/7-Dienstes betrieben wird. Zusätzlich besteht die Möglichkeit der Fernwartung, sofern die LIS an ein Kommunikationsnetz angeschlossen ist. Auf jeden Fall sollte der Nutzer im Falle einer Störung einen kompetenten und jederzeit erreichbaren Ansprechpartner (First-Level-Support) haben. Im Projekt hat sich diese Verfahrensweise bewährt, da nicht selten Anwendungsfehler für die Störung verantwortlich waren. Für die schnelle Kontaktaufnahme im Störfall eignen sich Aufkleber oder Beschriftungen an der LIS. Für durch Stromausfälle bedingte Einschränkungen kann die Einbindung der LIS an sogenannte Netzersatzanlagen bzw. die Versorgung der LIS durch Notstromgeneratoren sinnvoll sein. Mit steigenden Zahlen von EV in einer Flotte gewinnt die Notstromversorgung an Bedeutung.

8.4.3 Finanzierung

Für die in den Abschnitten 8.4.1 und 8.4.2 beschriebenen Betriebsaufwände sollten fortlaufende Haushaltsmittel eingeplant werden. Diese variieren je nach Art und Ausstattung der aufgebauten LIS. Mit Abschluss von Wartungs-, Service- und Erfassungs- bzw. Abrechnungssystemen bleiben die regelmäßig wiederkehrenden Betriebskosten kalkulierbar. Auch hier ist wichtig, dass eine Organisationsstelle benannt wird, die die Finanzierung der Betriebsaufwände bearbeitet. Bei der Polizei Niedersachsen sind diese Stellen in den Liegenschaftsverwaltungen angesiedelt.

8.5 Einschlägige Normen und Vorschriften

Im Rahmen des Betriebs elektrifizierter Fahrzeuge in einer Flotte müssen eine Vielzahl von einschlägigen Normen und Vorschriften beachtet und eingehalten haben. Dazu gehören insbesondere (nicht abschließend):

Mindeststandards

- Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)

Richtlinien und Vorschriften

- Unfallverhütungsvorschrift ALT: BGV/GUV – VA₃ NEU: DGUV Vorschrift 4 – Elektrische Anlagen und Betriebsmittel
- VDE Normen (Verband Deutscher Elektrotechnik)
- DGUV Information 200-005 – Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen
- DIN VDE 0105-100 “Betrieb von elektrischen Anlagen”
- DIN VDE 1000-10 “Anforderungen an die im Bereich Elektrotechnik tätigen Personen”
- DGUV Information 214-010 Sicherungsmaßnahmen bei Pannen-Unfallhilfe Bergungs- und Abschlepphilfe
- DGUV Information 205-022 Rettungs- und Löscharbeiten an Pkw mit alternativen Antriebstechnik

- DGUV Information 214-081 Sicherer Betrieb von Abschleppfahrzeugen und Bergungsfahrzeugen
- Merkblatt „Unfallhilfe und Bergen bei Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen“ des VDA (Verband der Automobilindustrie) in Zusammenarbeit mit diversen anderen Vereinen, Genossenschaften und Rettungskräften
- Flyer der BGV „Unfallhilfe & Bergen bei Fahrzeugen mit Hochvolt-Systemen“
- DGUV – FAQ Liste der AG „Handlungsrahmen Elektromobilität“
- Rettungsdatenblätter der Hersteller
- Gefahrgutbeförderungsgesetz – GGBefG sowie an die auf Grundlage dieses Gesetzes erlassene Verordnung „Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße – GGV-SEB“ bestimmen die rechtlichen Rahmenbedingungen des Transports eines Lithium-Ionen-Akkus.
- ADR
- VBG – Pannenhilfe an Elektro-und Hybridfahrzeugen mit Hochvoltsysteme

8.6 Fazit

- Je detaillierter in der Planungsphase der Aufbau der LIS vorbereitet wird, umso geringer und kalkulierbarer sind die anschließenden fortlaufenden Betriebsaufwendungen.
- Zuständigkeiten für den Betrieb der LIS müssen definiert und qualifizierte Ansprechpartner vorhanden sein.
- Ein Störungs- und Notfallkonzept zur Sicherstellung der Mobilität ist zwingend erforderlich.
- Eine Einweisung von Nutzenden in die Funktionsweise unterschiedlicher LIS hilft, Betriebsstörungen und/oder Anwenderfehler zu minimieren.
- LIS ist nach den einschlägigen Vorschriften einer regelmäßigen Sicherheitsüberprüfung zu unterziehen. Der Abschluss von Wartungsverträgen nach herstellerepezifischen Vorgaben bietet sich an.
- Ein ggf. vorhandenes Lademanagement ist regelmäßig auf Funktionalität zu prüfen.
- Optional kann die Implementierung eines Abrechnungssystems für interne (Fahrzeuge anderer Dienststellen) und externe (Mitarbeitende etc.) Nutzer erforderlich sein.

- Die Abnutzung der Batteriekapazität steht in direkter Abhängigkeit zur Nutzungsintensität und kann durch die Rotation der Fahrzeuge in nutzungsärmere Anwendungsfälle verlangsamt werden. Bei den im Projekt eingesetzten PHEV im ESD konnte ein signifikanter Kapazitätsverlust nach ca. 5 Jahren im 24/7-Dienst berechnet werden.
- Für PHEV, mit ihrer relativ geringen elektrischen Reichweite, wird der Verbrauch maßgeblich von der Ladehäufigkeit und dem Anwendungsfall beeinflusst. Daher gilt auch hier der Grundsatz: „Standzeit ist Ladezeit“
- Fahrweise, Fahrumgebung (Streckenprofil), und Umgebungstemperatur haben den größten Einfluss auf die reale Reichweite von BEV
- Aufgrund des höheren Gewichts, veränderter Gewichtsverteilung, verbrauchsoptimierten Reifen und des höheren Drehmomentes wurde ein verändertes Handling gegenüber ICV festgestellt. Im Rahmen einer Einweisung sollten die Nutzer darauf hingewiesen werden.
- Ein erhöhtes Gefährdungspotential nach Unfällen und Pannen ist gegenüber ICV nicht festzustellen. Beim Abschleppen sind die Vorgaben des Herstellers zu beachten.
- Ein Entladen der 12V-Batterie ist zu vermeiden, um die Startfähigkeit von EV zu gewährleisten. Dies kann z.B. bei längerfristig eingeschalteten Verbrauchern wie Blaulicht oder Funkt und abgeschalteter Zündung der Fall sein.
- Für Arbeiten an EV in behördeneigenen KFZ-Werkstätten müssen vorgeschriebene Voraussetzungen erfüllt werden.

III. Erläuterungen und Verweise

9 Grundlagen

9.1 Antriebsarten von Fahrzeugen

Fahrzeuge lassen sich anhand ihrer Antriebsart drei Oberkategorien zuordnen: den konventionellen Fahrzeugen (ICV, Internal combustion engine vehicle), Hybridfahrzeugen (HEV, hybrid electric vehicle) und Elektrofahrzeugen (electric vehicle). Während ICV neben dem Verbrennungsmotor nur einen relativ leistungsschwachen Generator (Lichtmaschine) aufweisen, werden bei HEV zusätzlich zum Verbrennungsmotor Elektromaschinen höherer Leistung eingesetzt. Bei EV entfällt der Verbrennungsmotor. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Hybrid- und Elektroantriebe, in welchen eine oder auch mehrere E-Maschinen verwendet werden. Der Einfachheit halber wird im Folgenden stets von einer E-Maschine gesprochen.

Für elektrische Antriebe werden unterschiedlichen Spannungslagen genutzt. Es wird unterschieden zwischen Niedervolt- und Hochvoltssystemen. Niedervoltssysteme umfassen Spannungen bis 60 V. Fahrzeug-Elektroantriebe im Niedervoltbereich werden häufig bei 48 V betrieben. Oberhalb von 60 V wird von Hochvoltssystemen gesprochen, welche zusätzlichen Sicherheitsvorschriften unterliegen. In Serienfahrzeugen werden derzeit Systeme bis zu einer Spannungslage von 800 V eingesetzt.³⁹

Die Verwendung einer E-Maschine im Antriebsstrang eines Fahrzeugs ermöglicht gegenüber einem ICV weitere Funktionen bzw. Betriebsmodi, unter anderem:⁴⁰

- Rekuperation (Bremsenergieerückgewinnung): Beim Verzögern des Fahrzeugs wird die E-Maschine als Generator betrieben und es wird elektrische Energie (aus der in Bewegung befindlichen Fahrzeugmasse gespeicherten kinetischen Energie) erzeugt, die in die Batterie zurück gespeist wird.

³⁹ Vgl. Tschöke et al. (2019).

⁴⁰ Vgl. Fischer et al. (2016); Tschöke et al. (2019).

- Elektrisches Fahren/E-Modus: Die in der Batterie gespeicherte Energie wird genutzt, um das Fahrzeug nur durch die E-Maschine anzutreiben.
- Boosten: Die in der Batterie gespeicherte Energie wird genutzt, um die Gesamtleistung des Fahrzeugs zu maximieren, indem E-Maschine und Verbrennungsmotor das Fahrzeug gleichzeitig antreiben (über die maximale Leistung des Verbrennungsmotors hinaus). Die Batterie wird dabei entladen.
- Hybrid-Modus: Die zum Antrieb benötigte Leistung wird durch die Fahrzeugsteuerung bzw. Betriebsstrategie zwischen E-Maschine und Verbrennungsmotor aufgeteilt. Dabei kann phasenweise die Batterie geladen oder entladen werden.
- Batterieladen: Der Ladezustand der Batterie wird stark erhöht, indem der Verbrennungsmotor erheblich mehr Leistung abgibt, als für den Antrieb des Fahrzeugs notwendig ist und die als Generator arbeitende E-Maschine die überschüssige Leistung in elektrische Energie umwandelt und in der Batterie speichert.

Die Betriebsmodi werden automatisch durch die Fahrzeugsteuerung oder manuell vom Fahrer aktiviert. HEV, die elektrisch fahren können, starten meistens im E-Modus. Wenn der Ladezustand der Batterie einen gewissen Schwellwert unterschreitet, wechselt das Fahrzeug automatisch in den Hybrid-Modus. Dieser Wechsel kann oft auch vom Fahrer manuell vorgenommen werden, ebenso wie umgekehrt der Wechsel vom Hybrid- in den E-Modus. Das Boosten muss häufig durch den Fahrer aktiviert werden, z. B. durch Betätigen des Kick-Down-Schalters des Fahr-/Gaspedals oder durch Aktivieren eines Sport-Modus. Demgegenüber wird die Rekuperation stets automatisch vom Fahrzeug aktiviert, sobald verzögert wird. Hier wird unterschieden zwischen der sogenannten Schub- und Bremsrekuperation. Von Schubrekuperation wird gesprochen, wenn das Gaspedal nicht oder nur sehr leicht und das Bremspedal nicht betätigt werden. Viele HEV und EV bieten sogenannte Rekuperationsstufen, welche die Stärke der Schubrekuperation beeinflussen. Bei hohen Rekuperationsstufen ist für viele Fahrmanöver das Betätigen des Bremspedals nicht nötig, da die Verzögerung beim Loslassen des Gaspedals bereits ausreicht (auch „One-Pedal-Driving“ genannt). Die Bremsrekuperation, bei der das Bremspedal betätigt wird, wird durch diese Stufen jedoch nicht beeinflusst, die Fahrzeugsteuerung entscheidet automatisch, ob rekuperiert wird und welcher Anteil der Bremswirkung durch die E-Maschine aufgebracht wird.

Hinweis: Ein Batterielade-Modus kann nur vom Nutzer aktiviert werden, da dieser aus Effizienzgründen grundsätzlich vermieden werden sollte (vgl. Abschnitt 9.2).

Der sogenannte Elektrifizierungsgrad eines Fahrzeugs gibt an, in welchem Verhältnis die Leistung des elektrischen Teils des Antriebs zu dem des verbrennungsmotorischen Teils steht. Ein geringer Elektrifizierungsgrad bedeutet einen höheren Anteil des Verbrennungsmotors an der Gesamtleistung des Antriebs. Ein ICV hat folglich einen Elektrifizierungsgrad von null, ein Elektrofahrzeug von 100 %. Neben dem Verhältnis der Leistung wird auch das Verhältnis der Energieträger (elektrische Energie, sprich Batteriekapazität, und im Kraftstoff enthaltene Energie) im Fahrzeug betrachtet. Abhängig vom Elektrifizierungsgrad können die genannten Funktionen in unterschiedlicher Ausprägung in einem Fahrzeug vorhanden sein. Hinsichtlich des Elektrifizierungsgrads können die Oberkategorien weiter unterteilt werden. Für HEV gibt es folgende Abstufungen:⁴¹

- Mild-HEV (MHEV): Geringster Elektrifizierungsgrad von HEV, häufig bei einer Spannungslage von 48 V. Aufgrund der geringen elektrischen Leistung und Batteriekapazität kann nur eingeschränkt oder gar nicht elektrisch gefahren werden.
- Full-HEV: Höhere Leistung der E-Maschinen und größere Batteriekapazität, sodass auch elektrisches Fahren über kurze Strecken (ca. 2–3 km) möglich ist. Überwiegend werden Hochvolt-Systeme, perspektivisch im unteren Leistungsbereich auch 48 V-Systeme eingesetzt.
- Plug-in-HEV (PHEV): Verfügen über eine deutlich größere Batteriekapazität als Full-HEV und die Möglichkeit die Batterie über eine externe Energieversorgung nachzuladen. Dadurch ist elektrisches Fahren auch über längere Strecken möglich (meist mehr als 40 km, perspektivisch 100 km und mehr). Bislang gibt es in diesem Bereich nur Hochvolt-Systeme.

⁴¹ Vgl. Fischer et al. (2016); Tschöke et al. (2019).

Elektrofahrzeuge werden unterschieden in:

- Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV): Sie verfügen ausschließlich über eine Batterie als Energiespeicher. Von den genannten Funktionen bzw. Betriebsmodi stehen folglich nur die Rekuperation und das elektrische Fahren zur Verfügung. Es werden fast ausschließlich Hochvoltsysteme eingesetzt, teilweise gibt es Fahrzeugkonzepte für innerstädtische Anwendung mit 48V-Systemen.
- Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb ohne externe Lademöglichkeit der Batterie (FCEV): Als Hauptenergiequelle dient eine Brennstoffzelle, welche vorwiegend mit Wasserstoff betrieben wird. Außerdem gibt es eine Batterie mit geringer Kapazität, vergleichbar zu Full-HEV. Die Funktionen des Antriebs sind identisch zu BEV. Es werden derzeit nur Hochvolt-Systeme verwendet.
- Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb mit externer Lademöglichkeit der Batterie (PFCEV): Größere Batteriekapazität (vergleichbar zu PHEV) und mit externer Lademöglichkeit. Können einen Batterielade-Modus bieten, um die Batterie über die Brennstoffzelle nachzuladen. Es werden derzeit ebenfalls nur Hochvolt-Systeme verwendet.

Des Weiteren gibt es Elektrofahrzeuge mit Range Extender (REEV). Diese verfügen über einen Verbrennungsmotor mit Generator oder eine Brennstoffzelle zur Erzeugung von elektrischer Energie, um die Reichweite des Fahrzeugs zu erhöhen. Sie sind folglich zwischen PHEV und BEV bzw. PFCEV und BEV angesiedelt. Der Verbrennungsmotor bzw. die Brennstoffzelle haben dabei häufig deutlich weniger Leistung als in einem PHEV oder PFCEV. Abbildung 31 zeigt den Elektrifizierungsgrad der verschiedenen Konzepte. Der Übergang von MHEV zu Full-HEV sowie von Full-HEV zu PHEV ist dabei nicht fest quantifiziert, sondern fließend. Die zunehmende Leistung der 48V-Systeme, die in der Regel den MHEV zugeordnet werden, führt zu einer Annäherung an Hochvolt-Konzepte, die eher zu den Full-HEV gezählt werden. Ferner gibt es Full-HEV-Konzepte, die mehr elektrische Leistung als einige PHEV-Konzepte aufweisen.

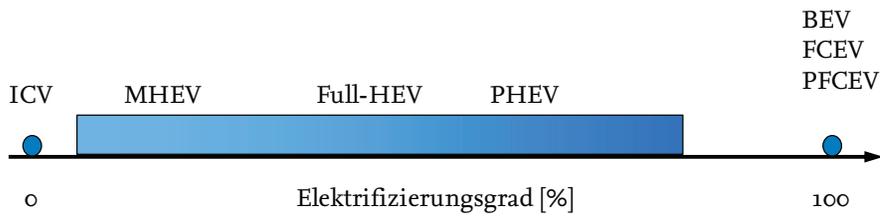


Abbildung 28: Elektrifizierungsgrad verschiedener Antriebsarten⁴²

In den kommenden Jahren wird voraussichtlich eine vollständige Elektrifizierung des Fahrzeugangebots erfolgen, sodass ICV durch mindestens MHEV ersetzt werden. Ferner wird die Nutzung von Verbrennungsmotoren in einigen Segmenten, insbesondere bei kleineren Fahrzeugen für Hersteller unwirtschaftlich, sodass das Angebot in einigen Fahrzeugkategorien künftig nur noch BEV umfassen wird. Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieben (FCEV) als Alternative zu BEV werden in größerer Stückzahl erst nach 2030 erwartet. Der Einsatz wird hier überwiegend bei großen und schweren Fahrzeugen erfolgen, insb. auch bei schweren Nutzfahrzeugen.⁴³

9.2 Wirkungsgrade von Antrieben

Elektrische Antriebe weisen gegenüber konventionellen Antrieben eine höhere Effizienz, also einen geringeren Energiebedarf, im Betrieb auf. Dies ist zum einen auf die Fähigkeit zur Rekuperation von Energie beim Bremsen und zum anderen auf die besseren Wirkungsgrade im Antriebsstrang zurückzuführen. Der Wirkungsgrad gibt das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand an, beispielsweise also von aus dem Energiespeicher entnommener Energie (Aufwand) zu abgegebener Energie zum Antrieb des Fahrzeugs (Nutzen):

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$$

Elektrische Maschinen (EM) weisen einen erheblich höheren Wirkungsgrad auf als Verbrennungsmotoren. Sie benötigen also weniger Energie aus dem Energiespeicher um die gleiche Energie für den Antrieb des Fahrzeugs zu erzeugen als ein Verbrennungsmo-

⁴² In Anlehnung an Fischer et al. (2016); Tschöke et al. (2019).

⁴³ Vgl. Dahlheim (2019); Mohrdieck (2020); Zipse (2019).

tor. Auch die Getriebe von EV sind effizienter, da sie aufgrund ihres einfacheren Aufbaus (1–2 statt 5–10 Gänge) weniger Komponenten enthalten, die Verluste verursachen. Im Gegenzug ist jedoch die Batterie als Energiespeicher im Gegensatz zu einem Kraftstofftank verlustbehaftet. Dieser Nachteil wird jedoch insbesondere durch die Wirkungsgradvorteile der E-Maschine überkompensiert. Abbildung 29 zeigt exemplarisch die Wirkungsgrade des Antriebs η_{An} (vom Energiespeicher bis ans Rad) für ein beispielhaftes ICV, (Full-)HEV, BEV und FCEV der gleichen Fahrzeugklasse im Fahrzyklus des WLTP bei optimalem Betrieb. Als Verbrennungsmotoren sind Otto-Motoren (benzinbetrieben) zugrunde gelegt.

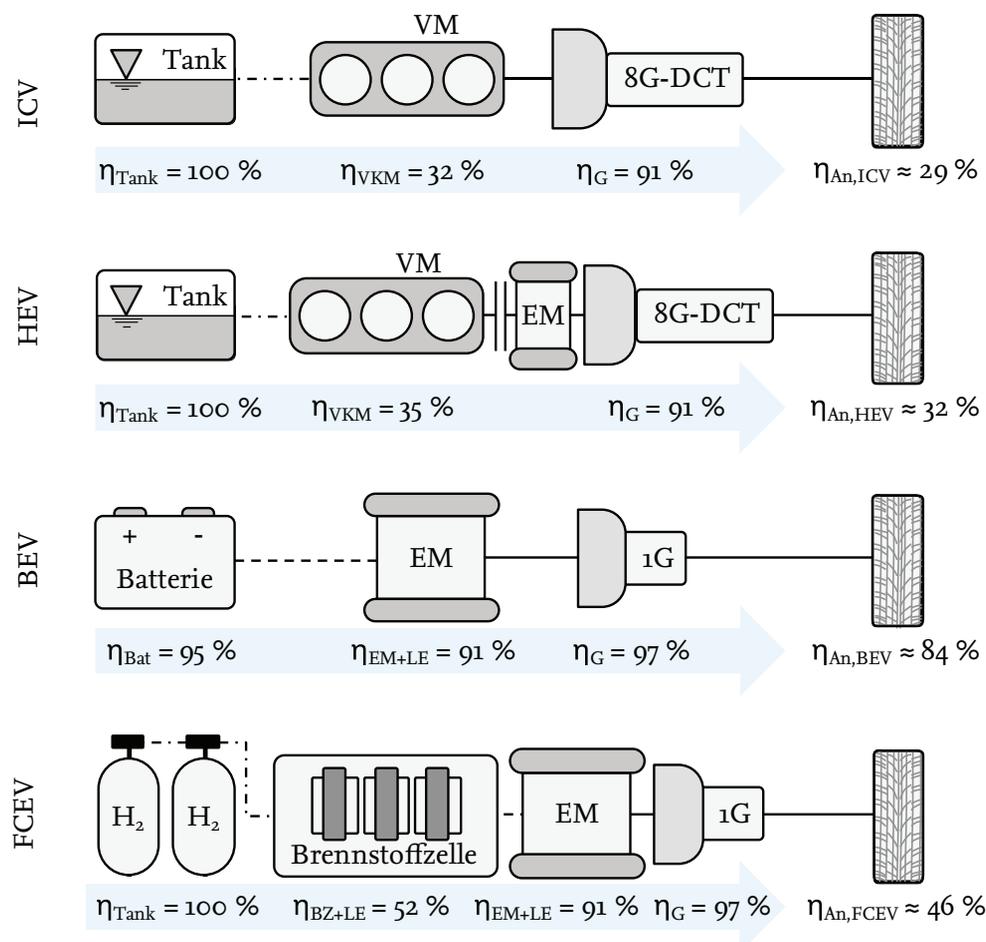


Abbildung 29: Antriebsstrangwirkungsgrade η_{An} beispielhafter Fahrzeuge der gleichen Klasse mit den Antriebsarten ICV, HEV, BEV und FCEV bei optimalem Betrieb im WLTP. EM: E-Maschine, LE, Leistungselektronik, 1G: 1-Gang-Getriebe, 8G-DCT: 8-Gang-Doppelkupplungsgetriebe, VM: Verbrennungsmotor

Das ICV weist den geringsten Antriebswirkungsgrad auf, beim HEV ist er etwas höher. Bei beiden Antrieben liegt der Wirkungsgrad bei ca. 30%. Das heißt, von der aufgewendeten Energie, in diesem Fall also dem aus dem Tank entnommenen Kraftstoff, gelangt nur etwa 1/3 an das Rad und kann zum Antrieb des Fahrzeugs genutzt werden. Die verbleibenden 2/3 sind als Verluste in Wärme umgewandelt worden. Demgegenüber weist das BEV einen erheblich höheren Wirkungsgrad auf, sodass von der aus der Batterie entnommenen Energie über 80% zum Antrieb des Fahrzeugs genutzt werden. Das FCEV liegt bei etwas unter 50% Antriebswirkungsgrad.

Daraus folgt, dass bei in etwa gleichem Energiebedarf für den Antrieb ein BEV wesentlich weniger Energie benötigt als ein ICV oder HEV. Je höher der Anteil des elektrischen Antriebs an der Fahrleistung ist, desto geringer ist daher der Energiebedarf. Dies gilt jedoch nur, wenn die elektrische Energie zum Antrieb nicht durch den Verbrennungsmotor des Fahrzeugs generiert wurde. Denn bei der Nutzung eines Batterielade-Modus wird die Energie mehrfach gewandelt. Dies ist aus Sicht des Antriebswirkungsgrads zu vermeiden. Abbildung 30 zeigt die Wirkungsgradkette bei Nutzung eines Batterielade-Modus und dem anschließenden elektrischen Antrieb.

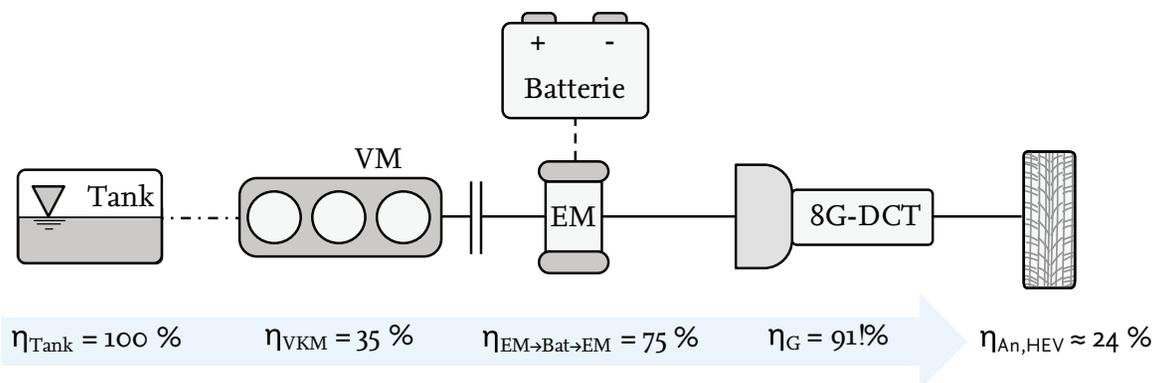


Abbildung 30: Antriebsstrangwirkungsgrad η_{An} eines HEV, wenn durch einen Batterielade-Modus zunächst die Batterie geladen und anschließend mit der geladenen Energie elektrisch gefahren wird. EM: E-Maschine, 8G-DCT: 8-Gang-Doppelkupplungsgetriebe, VM: Verbrennungsmotor

Bei einem Wirkungsgrad der E-Maschine (inkl. der Leistungselektronik) von 91 % und der Batterie von 95 % ergibt sich für den elektrischen Pfad ein Wirkungsgrad von ca. 75 %⁴⁴. Das bedeutet, dass der Wirkungsgrad bis zum Rad auf 24 % sinkt und damit unter dem des ICV liegt.

Obwohl BEV erheblich effizienter sind und dadurch mit der gleichen Energiemenge deutlich weiterfahren können als ICV, sind ihre Reichweiten oft kleiner. Dies liegt am hohen Energieinhalt bzw. der hohen Energiedichte flüssiger Energieträger. Diese sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Energieinhalt bzw. Energiedichte von Kraftstoffen

Kraftstoff	Energieinhalt bzw. Energiedichte [kWh/l]
Benzin	8,7
Diesel	9,7
Wasserstoff (bei 700 bar)	1,3

Eine Batteriekapazität von 60 kWh entspricht demnach ca. 6,3l Diesel bzw. ca. 6,9l Benzin. Ein BEV mit einer solchen Batteriekapazität erreicht in der Praxis Reichweiten von 350–400 km. Bei einem ICV reicht die entsprechende Kraftstoffmenge in der Praxis für lediglich 100–150 km.

9.3 Antriebsleistung elektrifizierter Antriebe

Die Angabe zur Antriebsleistung von EV unterscheiden sich häufig von ICV. Bei HEV gibt es neben dem Verbrennungsmotor noch eine oder mehrere E-Maschinen und es wird oft eine Systemleistung bzw. ein Systemdrehmoment vom Hersteller angegeben. Sie geben die maximale vom Antrieb abgegebene Leistung bzw. das maximale Drehmoment an. Die maximale Antriebsleistung unterscheidet sich daher oft von der theoretischen Gesamtleistung des Fahrzeugs, da sie sich nur in wenigen Fällen aus der Summe der Leistungen aller Antriebsmaschinen ergibt.

⁴⁴ Wirkungsgradkette: E-Maschine (Generatorbetrieb) -> Batterie (Laden) -> Batterie (Entladen) -> E-Maschine (Antrieb): $0,91 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,91 \approx 0,75$

Hinzu kommt, dass eine wesentliche Eigenschaft von E-Maschinen ist, dass sie kurzzeitig überlastet werden können, ohne dass dies zu einer Beschädigung führt. Dadurch können Drehmoment und Leistung erheblich gesteigert werden (Faktor drei und mehr). Möglich ist dies durch eine Erhöhung der Stromstärke. Da dies wiederum zu höheren Temperatur in der E-Maschine führt, muss vor Erreichen von definierten Temperaturgrenzen der Strom wieder reduziert werden. Daher wird unterschieden zwischen der Dauer- und Kurzeitleistung (auch Peak- oder Spitzenleistung) bzw. dem Dauer- und Kurzzeitdrehmoment. Die Dauerleistung bzw. das Dauermoment kann die E-Maschine unter allen Betriebszuständen zur Verfügung stellen. Demgegenüber können Spitzenleistung bzw. Spitzenmoment nur für einen begrenzten Zeitraum abgerufen werden.

Hersteller nutzen die Überlastbarkeit dabei sehr unterschiedlich aus. Bei einigen Fahrzeugen steht die Spitzenleistung über mehrere Minuten, bei anderen nur für einige Sekunden bereit. Die verfügbare Leistung wird außerdem von der Batterie beeinflusst. Ist die Batterietemperatur zu gering oder zu hoch, steht nicht die volle Leistung zur Verfügung, da dies die Batterie schädigen würde. Aufgrund dieser Eigenschaften kann die Leistungsfähigkeit eines Fahrzeugs je nach Fahrsituation mitunter deutlich variieren. Diese ist wiederum stark von der Auslegung eines Fahrzeugs durch den Hersteller abhängig, da die Leistungsfähigkeit eines elektrischen Antriebs, wie beschrieben, maßgeblich durch die Temperatur der Komponenten bestimmt ist.

Auch der Ladezustand der Traktionsbatterie hat einen Einfluss auf die Antriebsleistung. Hohe Leistungen bei geringen Ladezuständen schädigen die Batterie stark, sodass zum Schutz die zur Verfügung stehende Leistung reduziert wird. Dies führt zu einer Veränderung des Fahrzeugverhaltens. Bei (P)HEV kann die Antriebsleistung dadurch beispielsweise auf die maximale Leistung des Verbrennungsmotors beschränkt werden.

9.4 Reichweitenangaben

Die Reichweite von Fahrzeugen wird anhand von gesetzlich vorgeschriebenen Testverfahren ermittelt. Dazu wird auf Prüfständen unter definierte Randbedingungen ein vorgegebenes Fahrprofil mit dem Fahrzeug nachgefahren. Auf Basis des gemessenen Energieverbrauchs wird die Reichweite bestimmt. Es gibt weltweit unterschiedliche Ver-

fahren, in Europa wird gemäß WLTP⁴⁵ getestet. Daher wird nachfolgend stets auf dieses Verfahren Bezug genommen.

Bisher sind im WLTP moderate Umgebungsbedingungen (Temperatur 23°C⁴⁶) und nur wenige Nebenverbraucher – keine Klimatisierung – vorgesehen. Geplant ist jedoch eine Erweiterung des WLTP um Messungen bei kalten Temperaturen (unter 0°C), bei denen auch die Komfortnebenverbraucher verwendet werden.⁴⁷ Insbesondere bei BEV stellt die Klimatisierung einen maßgeblichen Verbraucher dar, vgl. Abschnitt 8.2.1. Während für die Beheizung des Innenraums bei ICV die Abwärme des Verbrennungsmotors genutzt und daher keine zusätzliche Energie benötigt wird⁴⁸, ist bei einem Elektroantrieb die entstehende Abwärme des Antriebs zu gering, um den Fahrgastraum zu heizen. Dies gilt auch für PHEV, wenn diese elektrisch fahren. Daher wird die Heizung elektrisch betrieben und deren Energie aus der Batterie entnommen. Dadurch steht für den Antrieb weniger Energie zur Verfügung. Dies führt dazu, dass gerade im Winter die Reichweite von BEV deutlich geringer ist. Gleiches gilt für die Klimaanlage, wobei diese auch bei ICV den Kraftstoffverbrauch erhöht. Jedoch ist der zusätzliche Energiebedarf gegenüber den Energieverlusten des Verbrennungsmotors einerseits sowie dem Energieinhalt des Kraftstoffs andererseits gering, sodass die Auswirkung auf die Reichweite bei ICV klein ist. Bei BEV wirkt sich der zusätzliche Energiebedarf stärker auf die Reichweite aus. Außerdem wird während der Nutzung der Energieverbrauch maßgeblich durch das Fahrverhalten beeinflusst. Das im WLTP verwendete Fahrprofil entspricht einer eher schonenden Fahrweise, sodass auch hier geringere Reichweiten in der Praxis aufgrund des geänderten Fahrprofils die Folge sind.

9.5 Aufbau des elektrischen Systems elektrifizierter Fahrzeuge

In EV sind zwei Spannungskreise vorhanden. Neben dem Hochvolt- oder 48V-Netz, welches für den E-Antrieb und zur Klimatisierung verwendet wird, auch weiterhin ein

⁴⁵ Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure

⁴⁶ Vgl. UN (2019).

⁴⁷ Vgl. UN (2019).

⁴⁸ Bei ICV werden zum Teil elektrische Zuheizter genutzt, um die Temperatur im Innenraum schneller zu steigern. Der Energiebedarf ist bei längeren Fahrten jedoch vernachlässigbar, da solche Systeme nur einige Minuten aktiv sind.

12V-Netz, welches für die Versorgung von beispielsweise Steuergeräten, Nebenaggregaten (Pumpen, Lüfter etc.) und ähnliches verwendet wird. Die Verbindung zwischen den Netzen mit unterschiedlichen Spannungslagen wird durch Spannungswandler (auch DCDC-Wandler) hergestellt. Abbildung 31 zeigt schematisch den Aufbau des Bordnetzes.

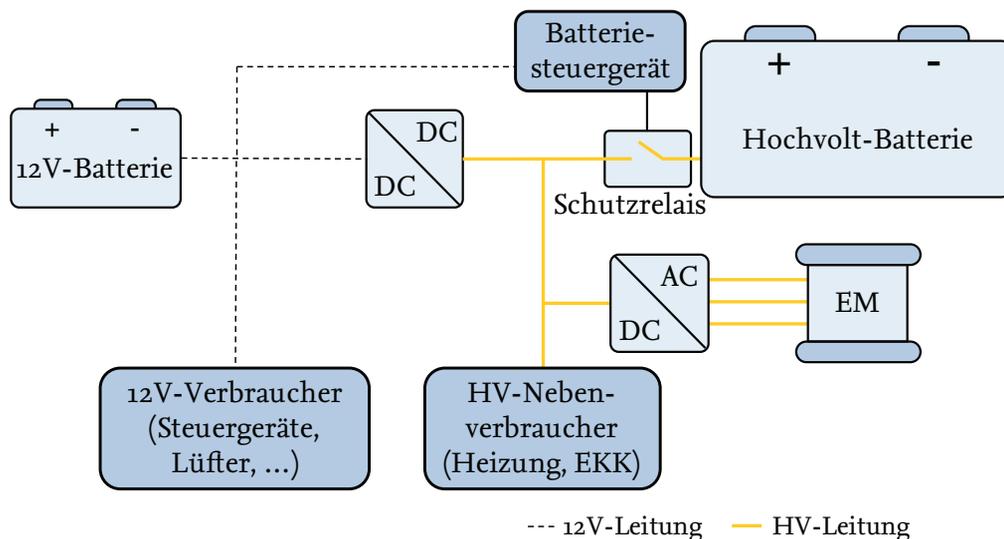


Abbildung 31: Schematische Darstellung der Bordnetz-Struktur von EV. Auf die Darstellung des Ladegeräts wurde der Übersichtlichkeit halber verzichtet. EKK: elektrischer Klimakompressor, DC: Gleichstrom, AC: Wechselstrom, EM: E-Maschine.⁴⁹

Aus Sicherheitsgründen kann das Hochvolt-Netz von der Hochvoltbatterie getrennt werden, diese Aufgabe übernehmen Schutzrelais. Im nicht betätigten bzw. stromlosen Zustand sind die Schutzrelais offen, sodass keine Spannung im Hochvoltkreis anliegt. Deshalb ist bei ausgeschaltetem Fahrzeug eine Versorgung des 12V-Netzes durch die Hochvoltbatterie nicht möglich. Zum Starten des Fahrzeugs und dem Schließen der Schutzrelais ist eine Versorgung durch das 12V-Bordnetz erforderlich. Eine entladene 12V-Batterie verhindert daher wie bei einem ICV das Starten. Im Stillstand bei ausgeschaltetem Fahrzeug werden daher auch alle Nebenverbraucher ausschließlich durch die 12V-Batterie versorgt. Dies ist bei Einsatzfahrzeugen und dem Betrieb der Sondersignalanlage von besonderer Bedeutung.

⁴⁹ In Anlehnung an Reif (2011); Tschöke et al. (2019).

9.6 Ladearten

Um ein EV zu laden, kommen zwei Technologien zum Einsatz. Die erste und primär gebräuchliche Technologie ist das konduktive Laden (kabelgebundene Laden). Derzeit ist das induktive Laden (kontaktloses Laden) ein Nischenprodukt. Das induktive Laden funktioniert über eine Spule im EV und eine Spule im Ladepunkt. Dabei müssen beide Spulen möglichst genau übereinander positioniert sein. Es entsteht ein magnetisches Wechselfeld in der Primärspule (Ladepunkt) welches einen Wechselstrom in der Fahrzeugspule induziert. Die Vorteile der induktiven Technologie sind, dass sie platzsparend und bequem ist, zudem kommen viele Einsatzmöglichkeiten in Frage (z. B. die Ladung während Ampelstopps). Die Nachteile, die der Grund für die geringe Verfügbarkeit dieser Technologie sind, sind der hohe Preis, dass der Ladevorgang, auch wegen geringer Wirkungsgrade, lange dauert und dass eine genaue Positionierung des EV erforderlich ist. Diese Nachteile zeigen, dass die Technik noch nicht ausgereift ist und somit für den derzeitigen Einsatz ungeeignet ist.⁵⁰

Vorrangige Nutzung erfährt das kabelgebundene Laden, welches mit Gleichstrom (DC) oder Wechselstrom (AC) erfolgen kann. Beim Laden mit AC kann das EV eine bis drei Phasen zum Laden nutzen. Die Spannung bleibt in jeder Phase bei 230 V. Um mehr Leistung aus dem Netz zu erhalten, wird dafür der Strom erhöht. Je nach Anschluss sind Stromstärken von bis zu 63 A möglich. Eine Beispielrechnung zeigt, wie von dem Strom auf die Leistung geschlossen wird.

$$P_{Gesamt} = n \cdot (U_{Strang} \cdot I) = 3 \cdot (230 \text{ V} \cdot 16 \text{ A}) = 11.040 \text{ W} = 11 \text{ kW}$$

Dabei stellt P_{Gesamt} die gesamte Leistung dar, die übertragen werden kann. Die Anzahl der Phasen n wird mit der Strangspannung U_{Strang} und dem Strom I multipliziert. Eine Auflistung von Ladearten und den zugehörigen Parametern ist der Tabelle 6 zu entnehmen.

⁵⁰ Vgl. Karle (2017).

Tabelle 6: Ladearten und ihre Eigenschaften⁵¹

	Wechselstrom			Gleichstrom	
Stromart	AC (1-Phasig)	AC (3-Phasig)		DC	
Stromstärke	Bis 16 A	3×16 A	3×32 A	3×63 A	Bis 500 A
Ladeleistung	Bis 3,7 kW	11 kW	22 kW	43,5 kW	Bis 500 kW
Ladeeinrichtung	Haushaltssteckdose Wallbox Ladesäule	Wallbox Ladesäule		Schnellladesäule DC-Wallbox	
Autorisierung	Schlüssel/RFID/SMS/PIN-Code/PayPal/EC				
Aufstellortbeispiel	Garage, Hauswand	Firmenparkplatz, öffentlicher Parkplatz		Tankstelle, Raststation	
Typische Ladezeit*	5–27 h	2–9 h	1–5 h	0,5–2 h	0,05–0,3 h

*Nach den Batteriekapazitätswerten von 17,6 kWh bis 100 kWh⁵²

Ein Gleichstromanschluss hat keine einzelnen Phasen, sondern zwei Leiter (positiv und negativ). Zwischen diesen beiden Leitern liegt eine Spannung, z. B. von 400 V, an. Somit können, wie es die folgende Beispielrechnung zeigt, bei einer maximalen Stromstärke von 200 A Leistungen von bis zu 80 kW erreicht werden.

$$P_{Gesamt} = U \cdot I = 400 \text{ V} \cdot 200 \text{ A} = 80.000 \text{ W} = 80 \text{ kW}$$

Einen Sonderfall stellen die High-Power-Charger dar. Mit speziellen Kühlsystemen können Ströme bis zu 500 A fließen, womit sich eine theoretische Leistung von 500 kW ergibt. Da die technischen Anforderungen und die damit verbundenen Kosten sehr hoch sind, gibt es diese Art von Ladesäulen primär an Autobahnen, wo ein schneller Ladevorgang notwendig ist. Zudem sind bisher nur wenige Fahrzeuge technisch ausgerüstet, um derart hohe Ladeströme aufzunehmen.

Wie viel Kilometer pro Ladestunde geladen werden können, wird in der Abbildung 32 dargestellt. Dabei wurde ein durchschnittlicher Verbrauch von 21 kWh/100 km nach

⁵¹ Vgl. DIN (2011); Zacher (2019).

⁵² Vgl. ADAC (2020).

den ADAC-Testwerten angenommen.⁵³ Es resultiert, dass bei einer Ladeleistung von bis zu 2 kW maximal 9,5 km geladen werden können. Eine Ladeleistung von 7,4 kW kann innerhalb einer Stunde eine Reichweite von etwa 35 km erzielen. Wird die Leistung auf 150 kW erhöht, können mit der geladenen Energie 714 km gefahren werden.

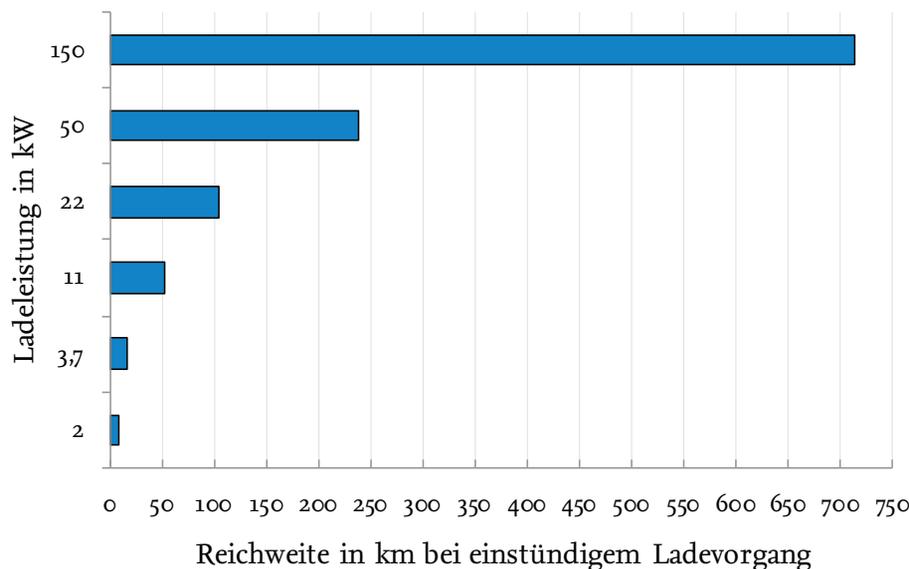


Abbildung 32: Darstellung der Reichweite in km bei einstündigem Ladevorgang nach Ladeleistung. Hier wurde ein mittlerer Bedarf von 21 kWh/100 km angenommen.⁵⁴

Steckdosen, Wallboxen, Ladesäulen oder Schnellladesäulen werden als Ladevorrichtungen bezeichnet. Eine Ladevorrichtung kann mehrere Ladepunkte (LP) besitzen. Ein LP ist nach der Definition ein Anschluss, an dem ein EV geladen werden kann.

Hinweis: Die Verwendung einer üblichen Haushaltssteckdose (Schuko, 1–3 Phasig) sollte weitestgehend vermieden werden, da diese nicht darauf ausgelegt ist, einen Großabnehmer über mehrere Stunden zu versorgen. Es kann zu Kabelbränden kommen.

Haushaltssteckdosen sollten nur in Ausnahmefällen genutzt werden. Eine Industriesteckdose sollten auf ihre Auslegung geprüft werden, wenn diese den Anforderungen

⁵³ Vgl. ADAC (2020).

⁵⁴ Vgl. ADAC (2020).

entspricht, kann sie zum Laden eines EV verwendet werden. Eine sichere Lademöglichkeit stellt eine Wallbox dar (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Übersicht von Ladevorrichtungen



	Wallbox	Ladesäule	Schnellladesäule/Multicharger
Ladepunkte	1–2	1–2	1–3
Steckertyp	Typ2	Typ2	Typ2 (Multicharger), CHAdeMO, CCS
Ladeleistung	3,7–22 kW	3,7–22 kW	Typ2 → 3,7–22 kW CHAdeMO → 20–400 kW CCS → 20–475 kW

Mit einer Wallbox, die eine zusätzliche elektrische Absicherung besitzt und auf den Hausanschluss abgestimmt ist, kann mit höheren Ladeleistungen (bis zu 22 kW) geladen werden. Als Aufstellort einer Wallbox eignet sich eine Hauswand oder Garage. Falls etwas gegen die Installation an der Wand spricht, kann die Wallbox ebenso auf einem Ständer installiert werden. Ladesäulen bieten durch ihre Statur die Möglichkeit freistehend installiert zu werden. Daher kommen diese Installationen im halböffentlichen und öffentlichen Bereich zum Einsatz. Im Gegensatz zu auf einem Ständer angebrachten Wallboxen sind sie stabiler und dadurch besser gegen Vandalismus und Parkrempler geschützt. Eine Schnellladesäule ist eine wesentlich größere Konstruktion. In dieser ist ein Gleichrichter verbaut, der den Wechselstrom aus dem Netz in Gleichstrom umwandelt. Da Batterien ausschließlich mit Gleichstrom geladen werden, erfolgt der Umwandlungsprozess von Wechsel- in Gleichstrom bei AC-Ladesäulen über einen Gleichrichter im EV. Durch diesen verbauten Gleichrichter, entweder im EV oder in der DC-Ladesäule, wird unter anderen die maximale Ladeleistung der EV bestimmt. Ein Multicharger besitzt neben einem DC-fähigen Ladepunkt weitere Anschlüsse wie einen AC-fähigen Ladepunkt oder einen weiteren DC-fähigen Ladepunkt. Bei allen Varianten

von Ladesäulen ist die Einrichtung einer Autorisierung möglich. Diese kann auf unterschiedliche Weise, wie etwa mit einem Schlüssel oder einer RFID erfolgen.

Die Ladedauer ist von der Batteriekapazität und der Ladeleistung abhängig. Eine Beispielrechnung veranschaulicht die Abhängigkeit der Ladedauer von der Ladeleistung.

$$t = \frac{W}{P} = \frac{35 \text{ kWh}}{3,7 \text{ kW}} = 9,46 \text{ h}$$

$$t = \frac{W}{P} = \frac{35 \text{ kWh}}{20 \text{ kW}} = 1,75 \text{ h}$$

Der Unterschied der Ladedauer t ist bei einer Ladeleistung P von 3,7 kW und einer Ladeleistung von 20 kW zum Laden einer Energie W von 35 kWh mit einer Differenz von fast acht Stunden sehr hoch.

Abhängig von der Ladeart und vom Betriebsstandort werden unterschiedliche Ladestecker verwendet, wie es der Tabelle 8 zu entnehmen ist. Im japanischen und US-amerikanischen Raum werden die Typ-1-Stecker verwendet, der mit den dort installierten einphasigen Netzen eine Leistung von bis zu 7,4 kW abrufen kann. Um Unsymmetrien zu vermeiden, ist der Strom im deutschen dreiphasigen Netz bei Nutzung nur einer Phase auf 16 A begrenzt. Eine Kommunikationsleitung ist nicht integriert. Der Typ-2-Stecker (auch Mennekes-Stecker genannt) findet in Europa Verwendung. Dieser ist hier in fast jedem EV zu finden (ca. 90 %). Ausnahmen bilden hier hauptsächlich ältere Modelle von z. B. japanischen und französischen Herstellern. Durch die drei integrierten Leitungen kann er Leistungen von bis zu 43,5 kW übertragen. Tesla nutzt diesen Stecker als einziger Hersteller in einer modifizierten Version um Gleichstrom bis zu 120 kW zu übertragen. Neben den drei Phasen, dem Erd- und Neutraleiter sind zwei Kommunikationsleiter (Contact Pilot und Proximity Pilot) in dem Typ-2-Stecker integriert.

Tabelle 8: Steckertypen⁵⁵

<p>Typ-1-Stecker (IEC 62196-2)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Japanische und nordamerikanische Lösung • Nicht kommunikationsfähig • Leistung: bis zu 7,4 kW (230 V, 32 A) • Einphasig, nur AC-Ladung möglich 	
<p>Typ-2-Stecker (IEC 62196-2)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Standard in Europa • Kommunikationsfähig • Leistung: bis zu 43,5 kW (AC), max. 120 kW (Tesla über DC) • Ein- bis dreiphasig, AC-Ladung 	
<p>Combo-2-Stecker (IEC 62196-3) (Combined Charging System CCS)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Standard in Europa und Nordamerika • Kommunikationsfähig • Leistung: bis zu 475 kW • DC-Ladung 	
<p>CHAdeMO-Stecker</p> <ul style="list-style-type: none"> • Standard in Japan • Kommunikationsfähig • Leistung: bis zu 400 kW • DC-Ladung 	

Der Combo-2-Stecker, auch CCS-Stecker (Combined Charging System) genannt, ist das Pendant zum Typ-2-Stecker. Mit ihm kann Gleichstrom geladen werden. Er zählt zum europäischen Standard für das Gleichstromladen. Da für die Steckerform, auf welche der Typ-2-Stecker aufbaut, zum Gleichstromladen keine zweite Steckvorrichtung am Fahrzeug notwendig ist, genügt lediglich das Vorhandensein zweier weiterer Anschlüsse unter den bereits bestehenden. Diese stellen die beiden DC-Leiter dar. Beim Combo-2-Stecker werden die vier Anschlüsse, die für die drei Leiter und den Neutralleiter im Typ-2-Stecker vorgesehen sind, ausgespart, da diese beim Gleichstromladen nicht notwendig sind. Die beiden Kommunikationsleiter (oben) sowie der Erdleiter (Mitte) werden weiterhin wie beim Typ-2-Stecker genutzt. In Japan wird der CHAdeMO-Stecker für das Gleichstromladen genutzt. Dieser ist nur noch selten in neuen Modellen, die in Europa verkauft werden verbaut. Die Verfügbarkeit von Schnellladepunkten, die einen CHAdeMO-Stecker besitzen, ist in Deutschland sehr gering.

⁵⁵ Vgl. DIN (2014).

Neben dem unidirektionalen Laden gibt es die Möglichkeit bidirektional zu Laden. Dabei ermöglicht das bidirektionale Laden die Fahrzeugbatterie als Speicher zu verwenden, indem ebenfalls ein Entladen der Batterie (Ausspeichern) ermöglicht wird. Das Ausspeichern einer Fahrzeugbatterie bietet sich an, um z. B. tagsüber erzeugten Strom einer Photovoltaikanlage (PV-Anlage) in den Abend- oder Nachtstunden zu nutzen. Zudem wird über Konzepte nachgedacht, den Strom ans Netz abzugeben, wenn dieser dort benötigt wird. Jedoch besteht hier die Schwierigkeit der Abrechnung für diesen Service. Es konnte noch nicht festgestellt werden, wie stark das vermehrte Be- und Entladen die Batterie beansprucht und ihren Wert so mindert. Eine bessere Option stellen installierte **Speicher** aus gebrauchten Fahrzeugbatterien dar. Diese werden wegen ihrer gesunkenen Batteriekapazität für die Fahrzeugverwendung ausgemustert, genügen jedoch für die lokale Anwendung z. B. im Zusammenspiel mit einer PV-Anlage und einem EV.

9.7 Kommunikation und Lademanagement

Es bestehen zwei Schnittstellen an denen Kommunikation stattfindet (vgl. Abbildung 33). Einerseits geschieht dies an der Schnittstelle EV und Ladepunkt (LP) und andererseits an der Schnittstelle LP und Backend. Die Kommunikation zwischen einem EV und einem LP erfolgt entweder über die Puls-Weiten-Modulation (PWM) oder über eine Power-Line-Communication (PLC). Regulatorisch wurde diese Schnittstelle (EV und LP) in der IEC 61857 und in der ISO 15118 genormt. Die zweite Schnittstelle (LP und Backend) wird in der IEC 63110 und in dem Open Charge Point Protocol (OCPP) beschrieben. Die Kommunikation erfolgt hier über JSON (Java-Script Object Notification) bzw. WebSocket.

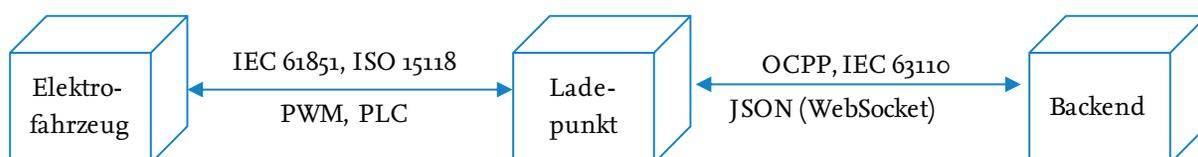


Abbildung 33: Ladekommunikationsstandards und Protokolle⁵⁶

⁵⁶ Vgl. Engel et al. (2020).

Nach der IEC 61851 können die unterschiedlichen Arten zu Laden in vier Ladebetriebsarten (Lademodi) unterteilt werden. Der Mode 1 ist nicht kommunikationsfähig und beschreibt das Laden an einer genormten Steckdose. Mode 2 ist die nächste Stufe, in der bereits eine Kommunikation möglich ist. Zusätzlich wird vorausgesetzt, dass sich eine weitere Fehlerstromschutzeinrichtung zwischen Fahrzeug und Ladestecker befindet oder als Teil eines integrierten Steuergeräts (in-cable control box) vorhanden ist. Mode 3 setzt eine Ladesäule bzw. Wallbox voraus. Mode 4 hingegen bezeichnet das Laden mit Gleichstrom über eine Schnellladesäule. Ab dem Mode 2 wird mittels PWM kommuniziert.⁵⁷

Zwischen dem Erdleiter (PE) und dem Control Pilot (CP) liegt eine Spannung von 12 V an. Wenn ein EV an den LP angeschlossen wird, erfolgt über die Variation dieser Spannung bzw. wird über die PWM ein Ausgangssignal erzeugt, das der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladepunkt dient. Dabei lassen sich bis zu sechs Fahrzeugzustände übermitteln.⁵⁸

Eine weiterentwickelte Form der Kommunikation stellt die High Level Communication (HLC) dar, die digital und bidirektional funktioniert. Die Umsetzung ist nur im Mode 3–4 möglich, zudem ist das Vorhandensein einer Kommunikationseinrichtung in dem Ladepunkt und dem EV Voraussetzung. Diese Kommunikationsform wird als Power Line Communication (PLC) bezeichnet. Über das PWM-Signal werden hochfrequente Signale moduliert, welche die Kommunikationsfähigkeit erweitern. Somit können zusätzliche Informationen wie Ladepläne und der SoC ausgetauscht werden.⁵⁹

Die Überwachung und Steuerung von Ladevorgängen erfolgt eine Ebene über dem Ladepunkt in einem Backend. Dieses nimmt die Informationen des Ladevorgangs auf und kann Ladepläne an den LP weitergeben. Kommuniziert wird dabei über ein Backendprotokoll wie das OCPP. Den derzeitigen Standard stellt das OCPP 2.0 dar. Das Steuern der Ladevorgänge ist seit der Version OCPP 1.6 möglich. Dieses Protokoll ist

⁵⁷ Vgl. DIN (2011).

⁵⁸ Vgl. ISO (2015); DIN (2011).

⁵⁹ Vgl. ISO (2015).

nicht herstellergebunden und wird von der Mehrheit der Ladesäulenhersteller angeboten. Nähergehende Informationen über das Protokoll zum Management von Lade- und Entladeinfrastruktur für EV lassen sich der DIN EN 63110 entnehmen. Eine Übersicht aller Normen, die die LIS betreffen, hat die Nationale Plattform für Elektromobilität geschaffen.⁶⁰

9.8 Lade- und Energiemanagement

Ein Backend ist ein zentrales System, das mehrere Ladepunkte auch an verschiedenen Standorten überwacht und steuert. Die Verbindung erfolgt zumeist über eine Internetverbindung. Entweder die Ladepunkte sind selbst internetfähig (z. B. über eine SIM-Karte) oder sie sind an die Internetverbindung am Standort angeschlossen. Um sich eine Internetanbindung jeder einzelnen Ladesäule an einem Standort zu ersparen, bietet sich hier das häufig angewendete Manager-Worker-Prinzip⁶¹ an (vgl. Abbildung 34). Dabei werden die einzelnen Ladesäulen, die keine spezielle Kommunikationsausstattung besitzen (Worker), mit einer Steuerungseinheit (Manager) verbunden, die die Daten gesammelt an das Backend weiterleiten kann.

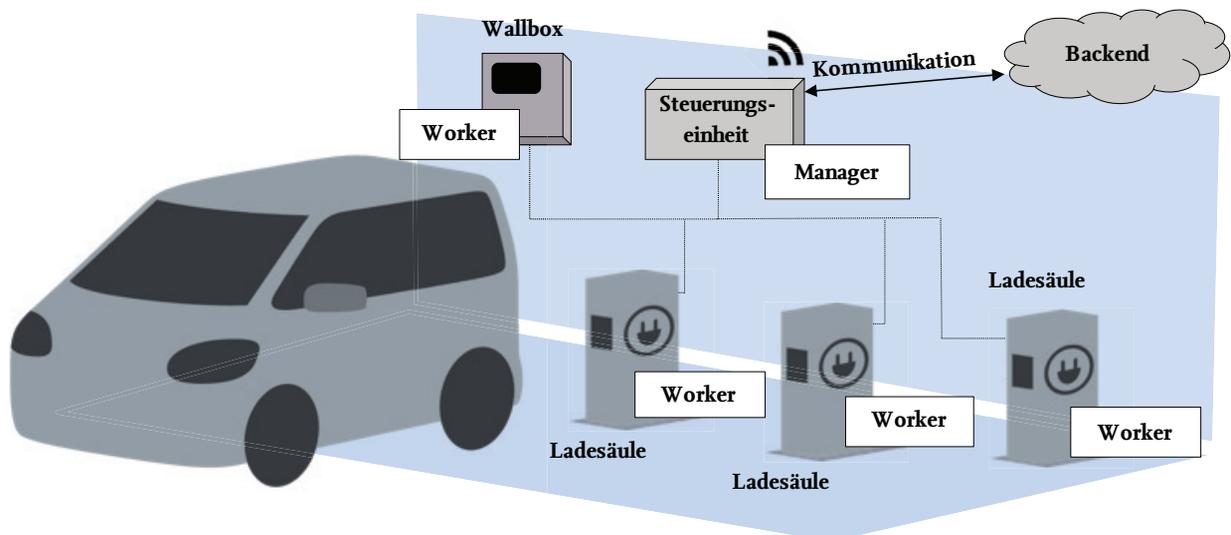


Abbildung 34: Manager-Worker-Prinzip

⁶⁰ Vgl. NPE (2017).

⁶¹ Dieses Prinzip ist ebenfalls als Master-Slave-Prinzip bekannt.

Ein Backend besteht aus einem Anwendungs- und einem Informationssystem (vgl. Abbildung 35). Das Informationssystem, das aus einem Monitoring- und einem Autorisierungsmodul besteht, bezieht alle Daten über ein Protokoll (z. B. OCPP 1.6), die es von den Ladepunkten erhält und speichert diese in einer Datenbank ab. Zudem wird auf die in der Datenbank hinterlegten Autorisierungsdaten zurückgegriffen. Das Anwendungssystem beinhaltet das Lademanagement, welches einen Ladeplan berechnet, der nach einem Ziel (z. B. nutzerfreundlich, ökologisch, ökonomisch) ausgerichtet ist und sendet diesen an die Ladesäule. Somit werden die Ladevorgänge gesteuert. Dabei entscheiden Ladealgorithmen wie gesteuert wird. Für die Berechnungen werden unterschiedlichste Daten, welche die Ladung beeinflussen, miteinbezogen, z. B. lokal erzeugte Leistung (Lastdaten) oder die Netzdaten.

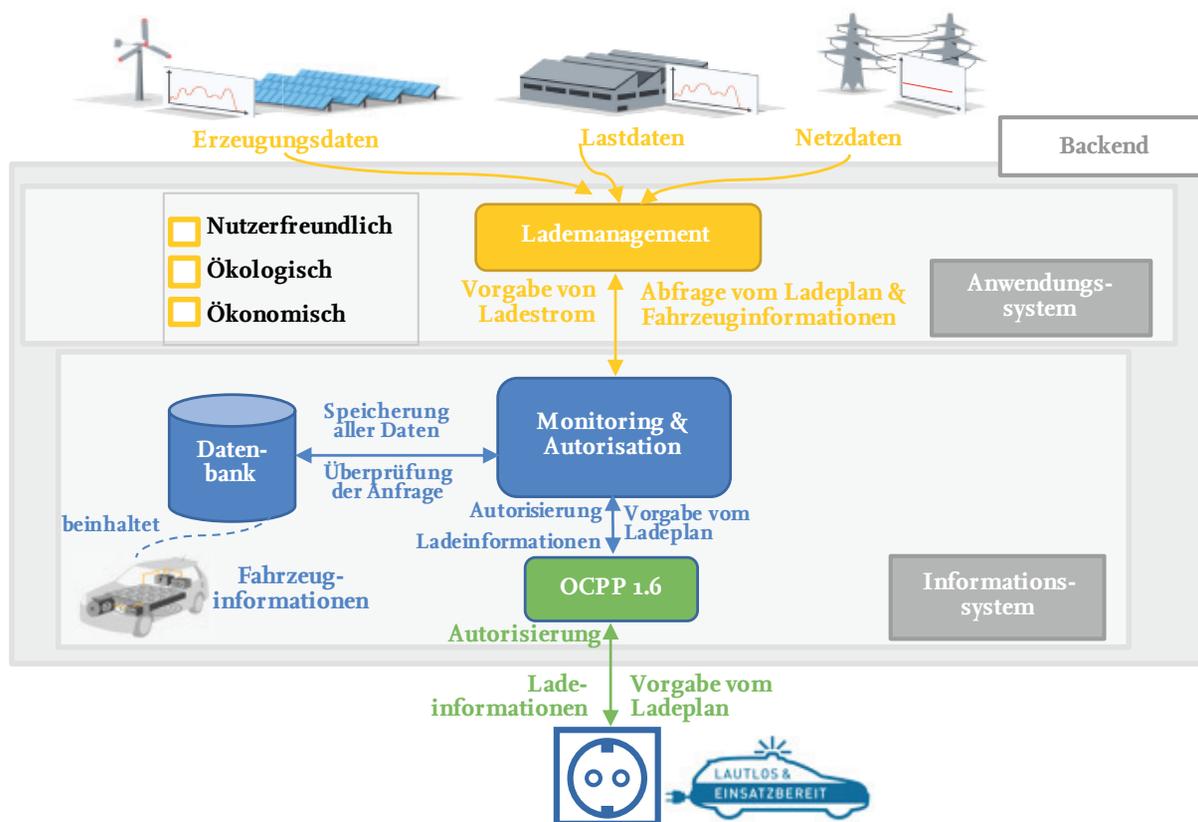


Abbildung 35: Aufbau eines Backends

Als Lademanagement wird die aktive Steuerung von Ladevorgängen bezeichnet. Je nach Umfang und Art der Eingangsdaten steigt die Komplexität. Einfache Lademanagementalgorithmen werden im statischen Lademanagement verwendet. Die Eingangsdaten sind in Abbildung 36 dargestellt. Statische Daten sind dadurch gekennzeichnet, dass ihre Änderung während des Ladevorgangs keinen Einfluss auf den erstellten Ladeplan haben. Vom statischen Lademanagement verwendete Ladealgorithmen sind unter anderem First-Come-First-Serve (FCFS) und Equal. Hierbei werden die Fahrzeuge der Flotte entweder priorisiert nach der Ankunftszeit geladen (FCFS) oder die zur Verfügung stehende Ladeleistung wird gleichermaßen unter allen EV aufgeteilt (Equal). Zudem gibt es die Möglichkeit Prioritätsfahrzeuge festzulegen, welche zu jeder Zeit mit voller Ladeleistung laden können. Der Vorteil des statischen Lademanagements liegt darin, dass keine weiteren Messgeräte oder Prognosen nötig sind. Input-Daten stellen die Daten der Fahrzeuge dar, zu diesen gehören der Fahrzeugtyp und die Batteriekapazität. In einer Datenbank befinden sich die gespeicherten Daten vergangener Ladevorgänge (historische Daten) ebenso, wie die Informationen über die RFID (radio-frequency identification) der Fahrzeuge, um eine Autorisierung freizugeben. Die RFID wird optional vor Beginn eines Ladevorgangs abgefragt und ist durch Karten, Schlüsselanhänger oder Smartphones abrufbar. Der Ladepunkt sendet im regelmäßigen Abstand durch den Zählerstand Informationen über die abgegebene Energie. An dem Standort sind alle LP in der Regel an einem gemeinsamen Netzanschlusspunkt angeschlossen, der eine festgelegte maximale Leistung hat. Diese Leistungsabgabe ist unter anderem durch den installierten Kabeldurchmesser und die zur Verfügung stehende Transformatorleistung begrenzt. Ein Ausbau des Netzanschlusses kann durch die Notwendigkeit neuer Transformatoren und Erdarbeiten im sechsstelligen Bereich sehr teuer werden. In vielen Fällen ist der Anschluss der LP am Netzanschluss der anderen Verbraucher (z. B. Gebäudelast) angeschlossen. Dies muss bei der Planung beachtet werden.

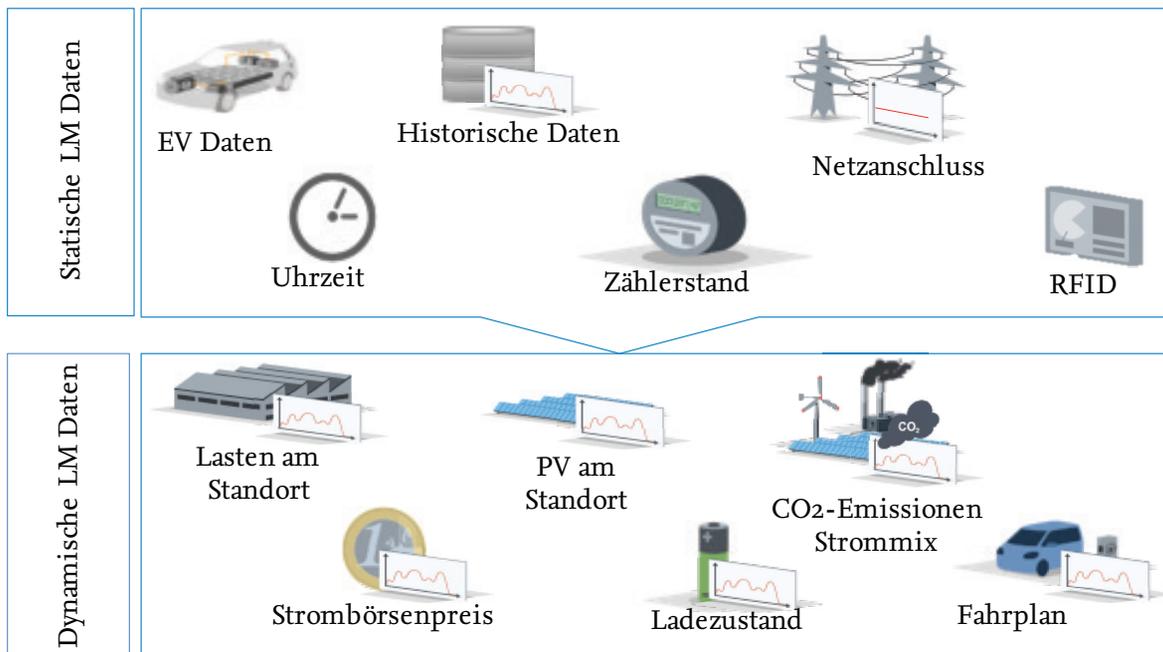


Abbildung 36: Übersicht über statische und dynamische Daten⁶²

Das dynamische Lademanagement arbeitet mit fluktuierenden Werten, wie der erzeugten Leistung aus Photovoltaik (PV) am Standort. Um diese Werte mit in das Lademanagement aufzunehmen, werden Schnittstellen zu anderen Programmen benötigt, die z. B. aus historischen Daten Prognosen berechnen. Anhand der umfangreichen Daten, die sich kontinuierlich anpassen, kann ein Ladeplan berechnet werden, der sich nach den Werten richtet. Eine Steuerung, um besonders viel am Standort erzeugte Leistung oder günstige Strompreise aufzunehmen, kann somit umgesetzt werden. Zu den dynamischen Komponenten gehören unter anderen die Lasten am Standort. Wenn z. B. Gebäudelasten am gleichen Netzanschlusspunkt wie die LP angeschlossen sind, ist von diesen Lasten abhängig wieviel Leistung den LP zur Verfügung steht. Wird diese Schnittstelle gemessen und anhand vorhandener Daten prognostiziert, können die Ladevorgänge dem angepasst werden. Der Strombörsenpreis kann bei Großabnehmern von Strom einen Einfluss auf das Ladeverhalten aufweisen. Zudem lassen sich Strompreise wegen ihrer Zusammenhänge mit dem Wetter gut prognostizieren. Ebenso ist die Erzeugung von Strom aus Photovoltaik (PV) am Standort ein Wert, an den sich gerichtet werden kann, um eine hohe Eigenverbrauchsquote zu erreichen. Wenn kein Strom aus eigener Erzeugung vorliegt,

⁶² Vgl. Engel et al. (2020); Pronobis/Kurrrat (2018).

kann dennoch ökologisch geladen werden, indem der derzeitige deutsche Strommix betrachtet wird. Um einen Ladeplan zu berechnen, der ebenfalls den Bedarf und die Ladedauer der EV einplant, ist es notwendig den Ladezustand und den Fahrplan der EV zu integrieren.

9.9 Batterierecycling

Die Batterie von elektrifizierten Fahrzeugen stellt einen entscheidenden Kostenfaktor dar und erzeugt signifikante Umweltwirkungen in der Herstellung. Daraus ergeben sich Anreize, durch ein Recycling Rohstoffe für den Wiedereinsatz zu gewinnen, um so Kosten und Umweltwirkungen zu reduzieren.

Hierbei lassen sich verschiedene Recyclingrouten unterscheiden. Neben der Wiederverwendung (z. B. als stationärer Speicher) liegt der Fokus beim Batterierecycling vor allem auf drei verschiedenen Verfahren zur Materialrückgewinnung, welche teils miteinander kombiniert werden.

Die Vorbehandlung lässt sich unterteilen in mechanische Trennung, thermische Prozesse, Lösungsprozesse und mechanisch-chemische Methoden. Diese unterscheiden sich bezüglich ihres Aufwands, den resultierenden Umweltwirkungen und der Substanzen, die in den nachfolgenden Schritten aus der Batterie zurückgewonnen werden können. Lösungsprozesse und mechanisch-chemische Methoden weisen das größte Rückgewinnungspotenzial auf, gehen aber auch mit vergleichsweise hohen Kosten für Anlagen und Lösemitteln einher.⁶³

Pyrometallurgische Prozesse ermöglichen die Rückgewinnung von Metallen durch Erhitzung. So können beispielsweise Legierungen von Kobalt, Nickel und Kupfer mit hoher Reinheit erzeugt werden. Die Rückgewinnung von Lithium erfordert typischerweise weitere Behandlungsschritte. Der hohe Energiebedarf stellt eine Herausforderung für die Wirtschaftlichkeit dieser Behandlung dar, außerdem ist eine Abgasnachbehandlung zur Reduzierung der Schadstoffemissionen in die Luft notwendig.⁶⁴

⁶³ Vgl. Lv et al (2018).

⁶⁴ Vgl. Lv et al (2018).

Hydrometallurgische Prozesse ermöglichen die Materialrückgewinnung aus Batterien mittels Auslaugung und Extraktion. Vorteile sind vor allem der Energiebedarf, weniger Emissionen im Vergleich zur Pyrometallurgie und der hohe Wirkungsgrad. Nachteilig wirkt sich aus, dass diese Prozessroute weniger flexibel bezüglich unterschiedlicher Materialzusammensetzungen der Batterie ist.⁶⁵

Derzeit scheint die Kapazität für Batterierecycling mittels hydrometallurgischer Prozesse in kommerziellen Anlagen etwa genauso groß wie das Recycling mittels pyrometallurgischer Prozesse und kombinierter Recyclingrouten (hydrometallurgisch und pyrometallurgisch) zusammen (ca. 30.000 t/Jahr). Nur wenige Prozessrouten erweisen sich zum jetzigen Stand als wirtschaftlich, vor allem die pyrometallurgische Route hinkt hier auf Grund der hohen Energiekosten hinterher.⁶⁶

Eine Abschätzung der Umweltwirkungen zeigt, dass durch die Rückgewinnung von Materialien mittels Batterierecycling eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen, verglichen mit dem Einsatz von Primärmaterialien, erzielt werden kann. Dies hängt jedoch nicht nur von der Prozessroute, sondern auch von der genauen Batteriezellchemie sowie des Zelltyps (Pouchzelle oder zylindrisch) ab und ist teils mit großen Unsicherheiten behaftet.⁶⁷ Typischerweise liegen die Treibhausgasemissionen im Bereich von -2 bis +2 Kilogramm CO₂-Äquivalente pro Kilogramm Batterie (negativer Wert: vermiedene Emissionen durch Ersatz von Primärmaterial).⁶⁸

9.10 BOS-spezifische Gegebenheiten

Wie aus dem vorliegenden Leitfaden zu erkennen, ist das Elektrifizierungspotenzial einer BOS-Flotte – je nach Anwendungsfall – in vielen Bereichen teilweise deutlich größer als häufig angenommen (vgl. Abbildung 15). Dies konnte am Beispiel der Polizei Niedersachsen für drei exemplarische Anwendungsfälle gezeigt werden. Als Grundlage für eine

⁶⁵ Vgl. Lv et al (2018).

⁶⁶ Vgl. Lv et al (2018).

⁶⁷ Vgl. Lv et al (2018); Ciez/Whitcare (2019).

⁶⁸ Vgl. Ciez/Whitcare (2019).

Flottenumstellung bzw. Elektrifizierung ist jedoch die detaillierte Kenntnis über die eigene Flotte und ihre Nutzung unabdingbar. Aus der Analyse von Fahrtenbüchern lassen sich erfahrungsgemäß nicht alle relevanten Daten mit der nötigen Validität erheben, welche für die Entscheidungsfindung zur Elektrifizierung erforderlich sind. Exemplarisch seien hier Parameter wie die Standzeiten der Fahrzeuge an den Heimatstandorten, die Anzahl der Fahrten pro Tag bzw. Schicht, die Streckenlänge pro Fahrt, das örtliche Siedlungs-/Geländeprofil oder die real gefahrenen (Höchst-) Geschwindigkeiten genannt. Einige dieser Parameter sind derzeit für die Elektromobilität erfolgskritisch. Daher wird empfohlen, sich vor der Entscheidungsfindung detailliert mit der eigenen Flotte zu befassen. Einige Anhaltspunkte können durchaus von den hier dargestellten Erfahrungen übertragen werden, da die Nutzungsszenarien des ESD, des KED oder der Verwaltungs- und Fiskalfahrten ähnlich sein dürften. Dennoch ist jede Flotte bzw. jeder Flottenteil individuell zu betrachten.

Neben der Alltagsnutzung sollte bei BOS-Fahrzeugen auch die Gewährleistung der Einsatzfähigkeit im Rahmen von Großeinsätzen (BAO-Lagen/Katastrophen) betrachtet werden. Häufig werden Fahrzeuge bei Großeinsätzen von ihrem Anwendungsfall in eine andere Nutzungsart umgesetzt und werden in temporär abweichend strukturierten Flotten genutzt. Exemplarisch seien hier die Fahrzeuge des ESD genannt, welche im Rahmen der Aufrufeinheiten (Einzeldiensthundertschaften) betrieben werden. Fahrzeuge des KED werden auch als zivile FUSTW im ESD, bei Mord- oder Sonderkommissionen sowie ebenfalls bei Aufrufeinheiten (Fahndungskommissionen) eingesetzt. Daher wird empfohlen, bereits bei der jeweiligen Fahrzeugbeschaffung diese Umstände zu berücksichtigen.

Gleiches gilt im Hinblick auf die gebotene Standardisierung. Um ungeplante Ausfälle von Fahrzeugen oder einzelnen Ladepunkten kompensieren zu können, ist eine wechselseitige Kompatibilität bei der Vorbereitung der Elektrifizierung zu gewährleisten. Hinsichtlich der schnellen technischen Entwicklung z. B. zu Ladegeschwindigkeiten, Batteriekapazitäten etc. sind die Standards mit einem angemessenen Zeithorizont vorzuplanen.

Neben der sogenannten „Reichweitenangst“ ist die Befürchtung eines Ausfalls der komplexen Technik, insbesondere der Batterie, ein weiterer Hinderungsgrund für die Elektrifizierung von BOS-Flotten. Nach bisherigen Erfahrungen kann gesagt werden, dass

sich die eingesetzten EV etabliert haben. Einzelne (hybride) Fahrzeuge erreichen sogar Laufleistungen von bis zu 90.000 Kilometer pro Jahr und Fahrzeug, ohne dass unplanmäßige Ausfälle oder Reparaturen erforderlich waren.

Um die elektrische Reichweite von BOS-Fahrzeugen in kurzer Zeit nachzuladen, sind an ausgewählten Standorten Schnellladesäulen empfehlenswert. Der Einsatz von Schnellladesäulen erhöht dabei auch das Elektrifizierungspotenzial einer Flotte (vgl. Abbildung 15). Dieses Potenzial verteilt sich jedoch heterogen, je nach Nutzung des betrachteten Flottenteils (z. B. ESD oder KED). Fahrzeuge, welche täglich über längere Zeiträume stehen, z. B. über Nacht, benötigen in der Regel keine Schnellladung. Anders sieht es bei Fahrzeugen aus, die normalerweise nur kurze Standzeiten haben (vgl. Abbildung 4).

Bei dem Aufbau der LIS wird empfohlen, die zu errichtenden Ladepunkte an den tatsächlichen und taktisch relevanten Standorten der Fahrzeuge zu orientieren (z. B. an der Straße vor dem Dienstgebäude, vgl. Abbildung 37).



Abbildung 37: Polizeifahrzeuge neben dem Haupteingang einer Dienststelle; Die Wallboxen wurden an der Hauswand hinter den Fahrzeugen installiert.

Der Standort der Ladepunkte hat einen wesentlichen Einfluss auf die Nutzerakzeptanz und damit auch auf die potenzielle Betriebskostensparnis. Häufig vermutete Beschädigungen oder missbräuchliche Benutzungen von polizeilicher LIS, welche öffentlich zugänglich ist, konnte bislang nicht festgestellt werden.

10 Literaturverzeichnis

- ADAC (2020) ADAC (2020). Aktuelle Elektroautos im Test: So hoch ist der Stromverbrauch.
<https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/elektromobilitaet/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/>
- AXA (2019) AXA (2019). AXA Konzern AG: E-Mobilität und Unfallrisiken: Verkehr unter Strom, Pressemitteilung, 2019, Zürich/Köln
- BGV (2019) BG Verkehr (2019). Pannen- und Unfallhilfe an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen. Flyer.
<https://www.bg-verkehr.de/medien/news/2019/ausgabe-4-2019/neu-erschienen/pannen-und-unfallhilfe-an-fahrzeugen-mit-hochvoltssystemen>
- BMU (2014) BMU (2014). Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 - Kabinettsbeschluss vom 3. Dezember 2014.
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Aktionsprogramm_Klimaschutz/aktionsprogramm_klimaschutz_2020_broschuere_bf.pdf
- BMU (2016) BMU (2016). Klimaschutzplan 2050.
<https://www.bmu.de/publikation/klimaschutzplan-2050/>
- BREG (2018) BREG (2018). Aktuelle Klimaschutzziele auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene - Nominale Ziele und Rechtsgrundlagen. Sachstandsbericht des Fachbereichs für Umwelt, Forschung, Reaktorsicherheit, Bildung und Forschung des deutschen Bundestags.
<https://www.bundestag.de/resource/blob/543798/743f401f49bea64a7af-491c6d9a0b210/wd-8-009-18-pdf-data.pdf>
- Ciez/Whitcare (2019) Ciez, R.E.; Whitacre, J.F. (2019). Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. In: Nature Sustainability 2.2 (2019): 148-156.
<https://www.nature.com/articles/s41893-019-0222-5>
- Dahlheim (2019) Dahlheim, C. (2019). Electro-Mobility Proof of Concept | Sales Strategy. Internationale Automobil Ausstellung, Frankfurt.
- DGUV (2012) DGUV (2012). DGUV Information 200-005 – Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen

- DGUV (2016) DGUV (2016). FAQ-Liste der AG „Handlungsrahmen Elektromobilität“
https://www.dguv.de/medien/fb-holzundmetall/sachgebiete/fahrzeug/elektromobilitaet/faq_elekro.pdf
- DIN (2011) DIN EN 61851 (2011). Elektrische Ausrüstung von Elektro-Straßenfahrzeug -
 Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge.
- DIN (2014) DIN EN 62196 (2014). Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeug-
 stecker - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen.
- EC (2019) EC (2019). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN
 PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF
 THE REGIONS. The European Green Deal. COM/2019/640 final.
- Engel et al. (2021) Engel, B.; Di Modica, G.L.; Gartner, J.; Pronobis, O.; Wussow, J. (2020). Technology
 and Challenges with Fleet Grid Integration.
- EU (2019) EU (2019). VERORDNUNG (EU) 2019/631 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS
 UND DES RATES vom 17. April 2019 zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue
 Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen
 (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011 (Neufassung).
- Fischer et al. (2016) Fischer, R., Küçükay, F., Jürgens, G., Pollak, B. (2016). Das Getriebebuch. 2. Auflage,
 Springer Vieweg, Wiesbaden.
- FVBG (2018) FVBG (2018). Fachausschuss Vorbeugender Brand- und Gefahrenschutz der
 deutschen Feuerwehren: Risikoeinschätzung Lithium-Ionen Speichermedien,
 2018
- ISO (2015) ISO 15118-1 (2015). Road vehicles. Vehicle to grid communication interface. Part 1:
 General information and use-case definition
- Karle (2017) Karle, A. (2017). Elektromobilität. Grundlagen und Praxis. 2., aktualisierte Auflage.
 München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag (Hanser eLibrary).
- LAG (2020) LAG (2020). Landesarbeitsgruppe, Evaluation der Kfz-Budgetierung. Abschluss-
 bericht.

- Lv et al. (2018) Lv, W. , et al. (2018). A critical review and analysis on the recycling of spent lithium-ion batteries. In: ACS Sustainable Chemistry & Engineering 6.2 (2018): 1504-1521.
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.7b03811>
- Mohr dieck (2020) Mohr dieck, C. (2020). Die diversifizierte Zukunft des Antriebs bei Mercedes-Benz. HEV – Hybrid- und Elektrofahrzeuge, Gifhorn.
- NKlimaG (2020) NKlimaG (2020). Niedersächsisches Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes und zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels (Niedersächsisches Klimagesetz – Nds. KlimaG) – ENTWURF.
https://www.niedersachsen.de/download/116752/Niedersaechsisches_Gesetz_zur_Foerderung_des_Klimaschutzes_und_zur_Anpassung_an_die_Folgen_des_Klimawandels_Niedersaechsisches_Klimagesetz_Nds._KlimaG_.pdf
- NPE (2017) Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) (2017). Die Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität 2020.
- Pronobis/Kurrat (2018) Pronobis, O.; Kurrat, M. (2018). Grid Supported Charging Management with Uncertainty Analysis. In: Detlef Schulz (Hg.): NEIS 2018. Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, Hamburg, 20-21 September 2018. Berlin: VDE Verlag, S. 255–260
- Reif (2011) Reif, K. (Hrsg.) (2011). Bosch Autoelektrik und Autoelektronik. 6. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Schleich (2020) Schleich, B. (2020). Der Thermal Runaway ist das Problem. In: Technikmagazin „Krafthand“. 23.05.2020
<https://www.krafthand.de/artikel/einen-kuehlen-kopf-bewahren-2-48896/>
- Schmidt et al. (2020) Schmidt, K.; Mennenga, M.; Pronobis, O.; Quidde, S.; Sander, M.; Schäfer, M.; Suckow, O.; Wiersig, R.; Herrmann, C.; Kurrat, M.; Küçükay, F.; Spengler, T.S. (2020). Strategische Planung von Fahrzeugflotten – Ein Bezugsrahmen und seine Anwendung am Beispiel der Elektrifizierung der Fahrzeugflotte der Polizei Niedersachsen. In: Proff, H. (ed): Wissenschaftsforum Mobilität 2020.
- TMH (2020) TMH (2020). The Mobility House. Checkliste E-Mobility - Laden zuhause.
https://www.mobilityhouse.com/media/productattachments/files/TheMobility-House-Checkliste_Installation-Ladestation_1.pdf

- Tschöke et al. (2019) Tschöke, H., Gutzmer, P., Pfund, T. (Hrsg.) (2019). Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Springer Vieweg, Berlin.
- UNFCCC (2008) United Nations Framework Convention on Climate Change (2008). Kyoto Protocol – Reference Manual.
https://unfccc.int/resource/docs/publications/o8_unfccc_kp_ref_manual.pdf
- UN (2019) United Nations: Addendum 15: United Nations Global Technical Regulation No. 15, United Nations Global Technical Regulation on the Evaporative emission test procedure for the Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP EVAP), Amendment 5. 2019
- Zacher (2019) Zacher, M. (2019). High Power Charging. In: Elektroautomobil (02), S. 80–84.
- Zipse (2019) Zipse, O. (2019). BMW Group Tech Workshop: E-Mobility & Battery Cell Technology. München.

11 Kontakt

Dr. Kerstin Schmidt

Technische Universität Braunschweig/Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF)

Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion

Mühlenpfordtstraße 23

38106 Braunschweig

E-Mail 1: kerstin.schmidt@tu-braunschweig.de

E-Mail 2: nff-lautlos@tu-braunschweig.de

Web 1: www.tu-braunschweig.de/aip/pl

Web 2: www.tu-braunschweig.de/nff/projekte/lautlos

Oliver Suckow

Polizeidirektion Lüneburg

Dezernat 01 – Zentrale Aufgaben

Auf der Hude 2

21339 Lüneburg

E-Mail 1: oliver.suckow@polizei.niedersachsen.de

E-Mail 2: lautlos@zpd.polizei.niedersachsen.de

12 Autorinnen und Autoren

Koordination, Konzept und Erarbeitung:

Dr. Kerstin Schmidt

Technische Universität Braunschweig

Oliver Suckow

Polizeidirektion Lüneburg

Mitwirkung:

Thorsten Graumann

Polizeidirektion Braunschweig

Dr.-Ing. Mark Mennenga

Technische Universität Braunschweig

Olga Pronobis

Technische Universität Braunschweig

Sina Quidde-Kik

Technische Universität Braunschweig

Marcel Sander

Technische Universität Braunschweig

Malte Schäfer

Technische Universität Braunschweig

Christian Schnabel

Zentrale Polizeidirektion Niedersachsen

Rico Wiersig

Zentrale Polizeidirektion Niedersachsen

